



Escola d'Enginyeria de Telecomunicació i  
Aeroespacial de Castelldefels

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

# TRABAJO DE FIN DE GRADO

**TÍTULO DEL TFG:** Meteodiversidad extrema: cuantificación de la diversidad de fenómenos meteorológicos extremos

**TITULACIÓN:** Grado en ingeniería de Sistemas Aeroespaciales. Mención en Aeronavegación

**AUTOR:** Marc Román Porras

**DIRECTORES:** Jordi Mazón y David Pino

**FECHA:** 22 de Julio de 2020

## Resumen

El concepto de meteodiversidad se usa para determinar y caracterizar la variedad de fenómenos meteorológicos en una región durante un periodo determinado. Concretamente, mediante el Índice de Meteodiversidad (MI), podemos cuantificar dicha variabilidad climática en base a un conjunto de variables que miden la ocurrencia de una serie de fenómenos meteorológicos.

El objetivo del presente trabajo reside en la obtención de la distribución geográfica de *MI* en España (sin incluir Canarias, Ceuta y Melilla) a lo largo del periodo 1981-2010 para dos tipologías de variables distintas: variables promedio y variables de carácter extremo. Son precisamente las variables extremas, las que dotan nuestro análisis de una mayor precisión y rigurosidad por evaluar fenómenos que se distancian de los valores promedios.

Los resultados tienen en cuenta las situaciones climáticas a escala sinóptica características de cada periodo interanual, las distribuciones específicas de cada variable considerada en el cálculo de meteodiversidad y la clasificación climática de Köppen. El análisis de la distribución geográfica de *MI* se usará para caracterizar las zonas más conflictivas del sector aeronáutico, a lo largo del territorio de estudio, en términos de diversidad meteorológica.

Además, para los aeropuertos de A Coruña, Adolfo Suarez Madrid-Barajas, Bilbao y Josep Tarradellas Barcelona-El Prat, se estudia si la influencia de las variables consideradas en *MI*, se ajusta con las situaciones climáticas expuestas en las guías meteorológicas de aeródromo, dispuestas por la AEMET únicamente para estos aeropuertos.

Todos los tópicos anteriores se recogen a lo largo del desarrollo del proyecto y se analizan obteniendo las consideraciones pertinentes con respecto a nuestro estudio, sus limitaciones y las labores futuras en materia de meteodiversidad.

## Overview

The concept of meteodiversity is used to determine and characterize the variety of meteorological phenomena in a region during a given period. Specifically, using the Meteodiversity Index (MI), we can quantify the climatic variability based on a set of variables which measures the occurrence of a series of meteorological phenomena.

The present work aims to obtain the geographical distribution of *MI* along Spain (without Canary Islands, Ceuta and Melilla) throughout the period 1981-2010 and considering two different types of variables: average variables and extreme variables. The extreme variables endow our analysis with greater precision and rigor by evaluating phenomena that are distant from the average values.

The results take into account the characteristic climatic situations on a synoptic scale for each seasonal period, the specific distributions of each variable considered in meteodiversity computation and the Köppen climate classification. The geographical distribution of *MI* will be used to characterize the aeronautical sector most conflictive areas, throughout the study territory, in terms of meteorological diversity.

Furthermore, in A Coruña, Adolfo Suarez Madrid-Barajas, Bilbao and Josep Tarradellas Barcelona-El Prat airports, the influence of *MI* variables is studied in order to see if they adjusts with the climatic situations exposed in the aerodrome meteorological guides, arranged by AEMET only for these airports.

All the previous topics are collected throughout the project and analysed obtaining the pertinent considerations regarding our study, its limitations and future work inside the field of meteorological diversity.

## **Dedicatoria**

Primeramente, quiero expresar mi sincero agradecimiento a los directores de este proyecto, Jordi Mazón y David Pino, respectivamente, por la guía, la implicación, la constancia y las pautas/correcciones recibidas aún con la situación vivida en los meses precedentes.

Sin sus consejos, recomendaciones y experiencia, tanto en la materia del trabajo como en la manera de expresar los resultados obtenidos (lenguaje y cohesión), no habría sido posible el desarrollo actual del trabajo.

En segundo lugar, quiero agradecer la implicación de Javier Sigró, investigador y profesor del departamento de geografía en la “Universitat Rovira i Virgili”, por su guía e información en la búsqueda y selección de las variables (promedio y extremas) que componen cada uno de los índices, de acuerdo con nuestra voluntad de estudio.

Por último, expresar mi agradecimiento a mi familia más cercana por todo el soporte recibido en la medida de lo posible.

# ÍNDICE

INTRODUCCIÓN .....	1
CAP. 1. METODOLOGÍA.....	3
1.1. El índice de meteodiversidad.....	3
1.2. Datos climatológicos .....	4
1.3. Variables consideradas para el cálculo de <i>MI</i> .....	6
1.3.1. Variables promedio.....	6
1.3.2. Variables extremas.....	7
CAP. 2. METEODIVERSIDAD A PARTIR DE VARIABLES PROMEDIO .....	11
2.1. <i>MI</i> a partir de variables promedio en el periodo 1981-2010.....	11
2.2. <i>MI</i> estacional a partir de variables promedio en el periodo 1981-2010 .....	13
2.2.1. Meteodiversidad en invierno .....	13
2.2.2. Meteodiversidad en primavera .....	15
2.2.3. Meteodiversidad en verano .....	16
2.2.4. Meteodiversidad en otoño .....	17
2.3. Conclusiones.....	18
CAP. 3. METEODIVERSIDAD A PARTIR DE VARIABLES EXTREMAS.....	21
3.1. <i>MI</i> en el periodo 1981-2010.....	21
3.2. <i>MI</i> estacional a partir de variables extremas en el periodo 1981-2010 .....	23
3.2.1. Meteodiversidad en invierno .....	23
3.2.2. Meteodiversidad en primavera .....	25
3.2.3. Meteodiversidad en verano .....	26
3.2.4. Meteodiversidad en otoño .....	28
3.3. Conclusiones.....	30
CAP. 4. GUÍAS METEOROLÓGICAS DE AERÓDROMO Y <i>MI</i> .....	34
4.1. A Coruña. LECO .....	34
4.2. Adolfo Suárez Madrid-Barajas. LEMD .....	36
4.3. Bilbao. LEBB .....	39
4.4. Josep Tarradellas Barcelona-El Prat. LEBL.....	41
REFERENCIAS.....	45

<b>APÉNDICE A .....</b>	<b>48</b>
<b>A.1. Método de la distancia inversa ponderada (IDW).....</b>	<b>48</b>
A.1.1. IDW en QGIS.....	49
<b>APÉNDICE B .....</b>	<b>50</b>
<b>B.1. Distribución del clima en España .....</b>	<b>50</b>
B.1.1. Situación anticiclónica invernal .....	50
B.1.2. Temporal de frío, nieve y viento .....	51
B.1.3. Situación de baja estival.....	52
B.1.4. Tiempo del noroeste.....	53
B.1.5. Gota fría.....	54
B.1.6. Clima interanual.....	55
<b>B.2. Distribución de fenómenos meteorológicos a lo largo del territorio español .....</b>	<b>56</b>
B.2.1. Temperatura media, máxima absoluta y mínima absoluta .....	56
B.2.2. Precipitación .....	60
B.2.3. Hidrometeoros. Tormentas.....	62
B.2.4. Hidrometeoros. Nieve.....	63
B.2.5. Niebla.....	63
B.2.6. Insolación y días despejados .....	64
B.2.7. Viento.....	66
<b>B.3. Clasificación climática de Köppen para la península entre 1981 y 2010 .....</b>	<b>67</b>
<b>APÉNDICE C .....</b>	<b>69</b>
<b>APÉNDICE D .....</b>	<b>71</b>
<b>D.1. MI promedio de todo el periodo .....</b>	<b>71</b>
<b>D.2. MI promedio para cada estación.....</b>	<b>73</b>
<b>D.3. Procesado de .csv para variables extremas .....</b>	<b>93</b>
<b>D.4. MI extremo para todo el periodo y por estaciones.....</b>	<b>95</b>

\*Se ha abreviado la nomenclatura de los capítulos en el índice (CAP.) para una mejor disposición del mismo.

# ÍNDICE DE FIGURAS

## CAPÍTULO 1. METODOLOGÍA

<b>Fig. 1.1</b> Representación gráfica de la función $MI = -(pi \cdot \log 2pi)$ .....	4
<b>Fig. 1.2</b> Estaciones meteorológicas consideradas para el caso de variables promedio. ....	5
<b>Fig. 1.3</b> Estaciones meteorológicas consideradas para el caso de variables extremas.....	5
<b>Fig. 1.4</b> Variables existentes en la base de datos de AEMET [2] para el periodo 1981–2010 en el caso del observatorio de Barcelona-Fabra. ....	7

## CAPÍTULO 2. METEODIVERSIDAD A PARTIR DE VARIABLES PROMEDIO

<b>Fig. 2.1</b> Distribución geográfica del promedio de $MI$ a partir de variables promedio en el periodo 1981-2010. ....	11
<b>Fig. 2.2</b> Distribución geográfica del promedio de $MI$ en invierno a partir de variables promedio en el periodo 1981-2010. ....	14
<b>Fig. 2.3</b> Distribución geográfica del promedio de $MI$ en primavera a partir de variables promedio en el periodo 1981-2010. ....	15
<b>Fig. 2.4</b> Distribución geográfica del promedio de $MI$ en verano a partir de variables promedio en el periodo 1981-2010. ....	16
<b>Fig. 2.5</b> Distribución geográfica del promedio de $MI$ en otoño a partir de variables promedio en el periodo 1981-2010.....	17

## CAPÍTULO 3. METEODIVERSIDAD A PARTIR DE VARIABLES EXTREMAS

<b>Fig. 3.1</b> Distribución geográfica del promedio de $MI$ a partir de variables extremas en el periodo 1981-2010. ....	21
<b>Fig. 3.2</b> Distribución geográfica del promedio de $MI$ en invierno a partir de variables extremas en el periodo 1981-2010.....	23
<b>Fig. 3.3</b> Distribución geográfica del promedio de $MI$ en primavera a partir de variables extremas en el periodo 1981-2010.....	25
<b>Fig. 3.4</b> Distribución geográfica del promedio de $MI$ en verano a partir de variables extremas en el periodo 1981-2010.....	27
<b>Fig. 3.5</b> Distribución geográfica del promedio de $MI$ en otoño a partir de variables extremas en el periodo 1981-2010.....	29

## CAPÍTULO 4. GUÍAS METEOROLÓGICAS DE AERÓDROMO Y $MI$

<b>Fig. 4.1</b> Configuración de pistas (izquierda) y situación geográfica del aeropuerto de LECO (derecha). Fuente [13]. ....	34
<b>Fig. 4.2</b> Contribución de las variables $DF$ y $FG6Bft$ en el $MI$ global y estacional para LECO. ....	35

<b>Fig. 4.3</b> Configuración de pistas (izquierda) y situación geográfica del aeropuerto de LEMD (derecha). Fuente [14].	36
<b>Fig. 4.4</b> Contribución de las variables <i>DF</i> , <i>DT</i> y <i>FG6Bft</i> en el <i>MI</i> global y estacional para LEMD.	37
<b>Fig. 4.5</b> Configuración de pistas (izquierda) y situación geográfica del aeropuerto de LEBB (derecha). Fuente [15].	39
<b>Fig. 4.6</b> Contribución de la variable <i>FG6Bft</i> en el <i>MI</i> global y estacional para LEBB.	40
<b>Fig. 4.7</b> Configuración de pistas (izquierda) y situación geográfica del aeropuerto de LEBL (derecha). Fuente [16].	41
<b>Fig. 4.8</b> Contribución de la variables <i>DT</i> , <i>DF</i> , <i>R20mm</i> y <i>FG6Bft</i> en el <i>MI</i> global y estacional para LEBL.	42

## APÉNDICE B

<b>Fig. B.1</b> Situación atmosférica de anticiclón de invierno. Fuente [22].	51
<b>Fig. B.2</b> Situación atmosférica del temporal de frío y nieve. Fuente [23].	52
<b>Fig. B.3</b> Situación atmosférica de un sistema de bajas presiones estival. Fuente [23].	53
<b>Fig. B.4</b> Situación atmosférica de frente de noroeste. Fuente [22].	54
<b>Fig. B.5</b> Situación atmosférica con dos embolsamientos de aire frío en superficie. Fuente [23].	55
<b>Fig. B.6</b> Distribución geográfica de la temperatura media en el periodo 1981-2010. [22].	57
<b>Fig. B.7</b> Distribución geográfica de la variable extrema <i>TR</i> en magnitud [24].	57
<b>Fig. B.8</b> Distribución geográfica de la temperatura máxima absoluta [22].	58
<b>Fig. B.9</b> Distribución geográfica de la temperatura mínima absoluta [22].	59
<b>Fig. B.10</b> Distribución geográfica de la variable extrema <i>DH</i> en magnitud [24]	59
<b>Fig. B.11</b> Distribución geográfica de la precipitación media acumulada [22].	60
<b>Fig. B.12</b> Distribución geográfica de la variable promedio <i>DR</i> [22].	61
<b>Fig. B.13</b> Tendencia de las variables extremas <i>CDD</i> y <i>R20mm</i> en la segunda mitad del siglo XX. Fuente [26].	61
<b>Fig. B.14</b> Distribución geográfica de la variable promedio <i>DT</i> [22].	62
<b>Fig. B.15</b> Distribución geográfica de la variable promedio <i>DN</i> [22].	63
<b>Fig. B.16</b> Distribución geográfica de la variable promedio <i>DF</i> [22].	64
<b>Fig. B.17</b> Distribución geográfica de la variable promedio <i>I</i> [22].	65
<b>Fig. B.18</b> Distribución geográfica de la variable promedio <i>DD</i> en magnitud [24]	65
<b>Fig. B.19</b> Tendencia en la magnitud del viento peninsular para un periodo de 30 años a una altura de 30 m. [27].	66
<b>Fig. B.20</b> Clasificación climática de Köppen en España para el periodo 1981-2010. [22].	68

## APÉNDICE D

<b>Fig. D.1</b> Ejemplo de tabla en formato .csv generada con las medias de todas las variables extremas calculadas para todo el periodo y por estaciones.	95
--	----



# ÍNDICE DE TABLAS

## CAPÍTULO 3. METEODIVERSIDAD A PARTIR DE VARIABLES EXTREMAS

<b>Tabla 3.1</b> Valor de las variables extremas y de <i>MI</i> para Jerez, San Javier, Donostia, Málaga y Madrid Barajas.....	24
<b>Tabla 3.2</b> Valor de las variables extremas y de <i>MI</i> para Vigo, Donostia, Zaragoza aeropuerto y Madrid Retiro.....	26
<b>Tabla 3.3</b> Valor de las variables y de <i>MI</i> en las estaciones Barcelona-Fabra, Almería, Jerez, Burgos y Donostia. ....	28
<b>Tabla 3.4</b> Valor de las variables y de <i>MI</i> en las estaciones Donostia, Segovia, Almería y Barcelona-Fabra.....	29

## CAPÍTULO 4. GUÍAS METEOROLÓGICAS DE AERÓDROMO Y *MI*

<b>Tabla 4.1</b> Contribución a <i>MI</i> (en %) de las variables <i>DF</i> y <i>FG6Bft</i> para LECO.	35
<b>Tabla 4.2</b> Contribución a <i>MI</i> (en %) de las variables <i>DF</i> , <i>DT</i> y <i>FG6Bft</i> para LEMD. ....	37
<b>Tabla 4.3</b> Contribución a <i>MI</i> (en %) de la variable <i>FG6Bft</i> para LEBB.....	40
<b>Tabla 4.4</b> Contribución a <i>MI</i> (en %) de las variables <i>DT</i> , <i>DF</i> , <i>R20mm</i> y <i>FG6Bft</i> para LEBL. ....	42

## APÉNDICE C

<b>Tabla C.1</b> Valor de las variables <i>DF</i> y <i>FG6Bft</i> para todo el periodo analizado y estacional para LECO. ....	69
<b>Tabla C.2</b> Valor de las variables <i>DF</i> , <i>DT</i> y <i>FG6Bft</i> para todo el periodo analizado y estacional para LEMD. ....	69
<b>Tabla C.3</b> Valor de la variable <i>FG6Bft</i> para todo el periodo analizado y estacional para LEBB. ....	69
<b>Tabla C.4</b> Valor de las variables <i>DT</i> , <i>DF</i> , <i>R20mm</i> y <i>FG6Bft</i> todo el periodo analizado y estacional para LEBL. ....	70



## INTRODUCCIÓN

Vivimos en una sociedad cada vez más marcada por los cambios: climáticos, sociales, ambientales, económicos... Cada uno de ellos podría ser cuantificado atendiendo a su diversidad, su carácter cambiante de un momento a otro.

Diferencia, distinción, variedad, infinidad o abundancia de cosas diferentes, desemejanza, disparidad o multiplicidad es lo que agrupa, bajo una misma palabra, el concepto de diversidad (ver [1]).

Estos conceptos se van a aplicar a dos áreas científicas que, en las últimas décadas han ido cobrando cada vez más interés por los temas que abarcan: la meteorología y la climatología.

El presente trabajo, analiza la meteodiversidad en España, sin incluir Canarias, Ceuta y Melilla, mediante un índice introducido por los directores de este proyecto (ver [2]). El Índice de Meteodiversidad (MI), calculado para diferentes estaciones, se interpola para mostrar su distribución geográfica en toda el área de estudio. El periodo considerado va desde 1981 hasta 2010. Es decir, el estudio tiene validez climática según define la Organización Meteorológica Mundial [3]. Además, se ha analizado tanto el valor global para todo el periodo como los valores estacionales.

Para el cálculo de *MI* se han considerado dos tipos de variables: variables promedio designadas por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) [4] y variables de carácter extremo designadas por la European Climate Assessment and Dataset (ECA&D) [5]. Es precisamente en estas últimas donde reside el principal interés del trabajo debido a la naturaleza y al impacto que pueden conllevar. El análisis extremo nos permite introducir el nuevo concepto de meteodiversidad extrema, basado en situaciones que se distancian del análisis promedio.

Para finalizar, debemos comentar la importancia del estudio para el sector aeronáutico, especialmente teniendo en cuenta la tendencia hacia un marco de crecimiento en los años venideros, sobre todo a nivel europeo, Single European Sky ATM Research (SESAR). La aviación es un sector muy sensible a las condiciones meteorológicas por las demoras y accidentes que estas conllevan a nivel global.

Cabe destacar, que dada la situación de fuerza mayor e incertidumbre que estamos viviendo por la COVID-19, la evolución planteada bajo el marco SESAR para los próximos años en el sector del transporte aéreo puede verse fuertemente afectada. Sobre todo teniendo en cuenta las dificultades en relación a las medidas de distanciamiento interpersonal o de seguridad que alteraran de manera directa el flujo de pasajeros a nivel mundial.

El sector aeronáutico, deberá recibir este estudio como una sugerencia, una indicación sobre cómo se comporta la variabilidad del clima y sus fenómenos en una región determinada. De este modo, se podrán tomar consideraciones en

relación al carácter cambiante del clima sobre procedimientos y/o emplazamientos actuales o futuros en el área de estudio. Todo ello bajo el marco de crecimiento de SESAR y las correspondientes alteraciones consecuencia de la COVID-19. Los estudios y predicciones del campo meteorológico influyen significativamente en el sector aeronáutico; más aún cuando se definen variables extremas, por tanto, estará presente en todo momento a lo largo del trabajo.

# CAPÍTULO 1. METODOLOGÍA

## 1.1. El índice de meteodiversidad

El término biodiversidad se relaciona con la variedad y/o diversidad de organismos en un ecosistema dado como puede ser un bosque, un desierto o un lago. Existen diversos parámetros que se usan para designar o medir en términos de biodiversidad; uno de ellos, es el índice de Shannon (ver [6]):

$$H = - \sum_{i=1}^R p_i \cdot \log_2(p_i) \quad (1.1)$$

Este índice, mide la entropía (incertidumbre) al predecir la identidad de la especie de un individuo extraído al azar de un conjunto de datos de interés.

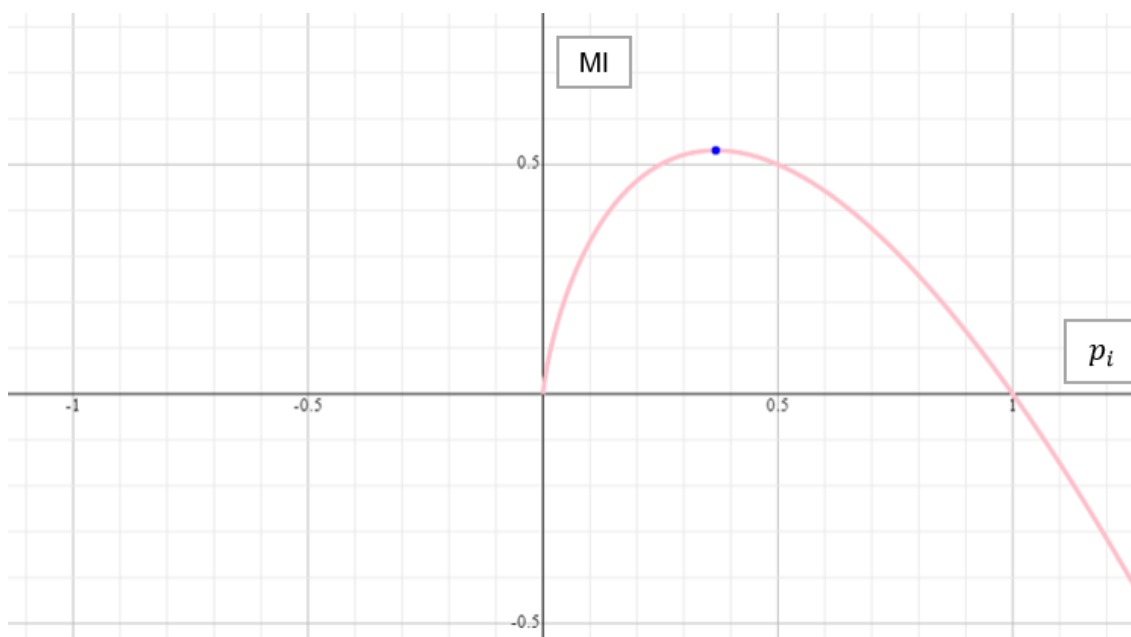
Mazón y Pino (2017) [2] se basaron en la definición que Shannon (1948) [6] propuso para el campo de la biología para definir un Índice de Meteodiversidad (MI):

$$MI = - \sum_{i=1}^S p_i \cdot \log_2(p_i) \quad (1.2)$$

$$p_i = n_i/N \quad (1.3)$$

donde  $S$  en (1.2) hace referencia al número total de variables o parámetros que vamos a considerar. El término  $p_i$  en (1.2-1.3) es la proporción entre el valor de cada variable considerada  $n_i$  y la suma  $N$  del total de las variables consideradas para el cálculo de  $MI$ .

En nuestro caso,  $p_i$  es menor que 1. Podría ser igual a la unidad en un caso límite sin sentido físico, ya que equivaldría a considerar una única variable para el cálculo de la meteodiversidad, que en ese caso tomaría valor cero.  $MI$  en función de  $p_i$  se representa en la Figura 1.1.



**Fig. 1.1** Representación gráfica de la función  $MI = -(p_i \cdot \log_2(p_i))$

Por lo tanto, en cada elemento del sumatorio de la función  $MI$  se obtiene un valor en el eje de ordenadas situado en el intervalo (0, 0.53074) respecto a cada valor de entrada  $p_i$  en un rango de 0 a 1. Observando la función (Figura 1.1), podemos ver para qué valores del eje de abscisas ( $p_i$ ) obtenemos un valor máximo de  $MI$ .

## 1.2. Datos climatológicos

Para el estudio de meteodiversidad a partir de las variables promedio se ha hecho uso de datos referentes a normales climatológicas que AEMET [4] proporciona a nivel global para el período 1981-2010. Los datos incluyen no solo el valor promedio global para todo el periodo sino también el promedio para cada mes.

Para el estudio de la meteodiversidad de variables extremas se ha usado el criterio de la ECA&D [5] para definir las variables que componen el  $MI$  extremo bajo el mismo periodo (1981-2010) y condiciones.

Se han considerado un total de 57 estaciones para el caso de variables promedio y 56 para el caso extremo. Se han considerado exclusivamente estaciones meteorológicas en lugares donde existe, o podría existir un aeródromo o aeropuerto. En las Figuras 1.2 y 1.3 se muestra la situación de las estaciones para cada análisis:



**Fig. 1.2** Estaciones meteorológicas consideradas para el caso de variables promedio.



**Fig. 1.3** Estaciones meteorológicas consideradas para el caso de variables extremas.

Se ha usado Matlab para leer y procesar la información de las bases de datos de AEMET y ECA&D, en relación a cada caso de estudio (promedio y extremo respectivamente), para obtener *MI* en cada una de las estaciones anteriores. El apéndice D muestra en detalle el código que se ha usado para procesar dichos datos con una finalidad puramente expositiva.

Para llevar a cabo la interpolación de *MI* en todo el área de estudio, a partir de los datos puntuales en cada estación, se ha usado la versión más reciente (3.12) del software gratuito QGIS [7].

Los sistemas de información geográfica, como es el caso de QGIS, nos ofrecen una serie de técnicas o métodos posibles a la hora de hacer uso de las herramientas de interpolación. Específicamente, QGIS dispone de tres técnicas universalmente conocidas y probadas como son: el método de la distancia inversa ponderada (IDW), la interpolación de red triangular (TIN) y el método de Kriging con todas sus variaciones (Kriging ordinario, Co-Kriging, etc...).

En el presente trabajo se ha hecho uso del método IDW para la generación de los mapas de interpolación. En el Apéndice A, se describen las generalidades del método y se justifica su elección.

### 1.3. Variables consideradas para el cálculo de *MI*

En esta sección se describen y detallan las variables consideradas para calcular *MI*, tanto en el caso de variables promedio como extremas.

#### 1.3.1. Variables promedio

Según la Organización Meteorológica Mundial, el uso de variables promedio tiene dos finalidades básicas: constituyen una referencia para evaluar condiciones climáticas actuales o recientes y se usan con fines predictivos como indicadores de las condiciones que probablemente se observen en un determinado lugar en el futuro.

Para el estudio del *MI* promedio, se han considerado siete variables designadas según AEMET [4] y promediadas durante todo el periodo y en cada uno de los meses del año. Dichas variables, capaces de describir de manera adecuada la variabilidad climática de cada estación para el periodo 1981-2010, son las siguientes:

- **DR:** número de días de precipitación igual o superior a 1mm durante el periodo analizado.
- **DN:** número de días de nieve durante el periodo analizado.
- **DT:** número de días de tormenta durante el periodo analizado.
- **DF:** número de días de niebla durante el periodo analizado.
- **DH:** número de días de helada durante el periodo analizado.
- **DD:** número de días con cielo despejado, referente a SKC “Sky Clear” (0 oktas), durante el periodo analizado.
- **I:** número de horas de sol durante el periodo analizado.

La Figura 1.4 muestra un ejemplo de los datos dispuestos para cada estación.



## Valores climatológicos normales. Barcelona, Fabra

Periodo: 1981-2010 - Altitud (m): 408

Latitud: 41° 25' 6" N - Longitud: 2° 7' 27" E - Posición: [Ver localización](#)

[Exportar a csv](#)

Mes	T	TM	Tm	R	H	DR	DN	DT	DF	DH	DD	I
Enero	8.2	11.1	5.3	50	69	4.8	0.5	0.4	4.5	1.8	6.5	166
Febrero	9.1	12.5	5.7	43	69	4.3	0.7	0.5	3.9	1.6	5.2	175
Marzo	11.4	15.2	7.6	44	69	5.1	0.3	0.5	5.0	0.4	5.3	188
Abril	13.2	17.2	9.1	53	68	5.8	0.0	1.3	4.2	0.0	3.9	211
Mayo	16.8	21.0	12.5	58	68	5.7	0.0	1.8	4.3	0.0	3.7	248
Junio	20.8	25.2	16.4	30	67	3.5	0.0	1.6	2.4	0.0	5.6	270
Julio	23.8	28.4	19.3	24	66	1.9	0.0	1.2	1.6	0.0	9.1	304
Agosto	23.9	28.3	19.5	41	70	4.3	0.0	2.9	1.9	0.0	5.6	262
Septiembre	20.7	24.6	16.7	75	74	5.5	0.0	3.2	2.6	0.0	3.8	190
Octubre	16.8	20.1	13.4	91	75	6.5	0.0	1.8	5.2	0.0	3.4	178
Noviembre	11.8	14.7	8.8	66	71	5.1	0.1	0.9	4.3	0.2	5.1	158
Diciembre	9.1	11.8	6.4	46	69	4.6	0.2	0.4	3.6	0.8	6.4	156
Año	15.5	19.2	11.7	621	70	57.1	2.0	16.6	43.7	4.9	64.5	-

**Fig. 1.4** Variables existentes en la base de datos de AEMET [4] para el periodo 1981–2010 en el caso del observatorio de Barcelona-Fabra.

Los valores estacionales se han calculado a partir del promedio durante todo el periodo en cada uno de los meses del año, agrupándolos de la siguiente manera:

- **Invierno (DEF):** diciembre, enero y febrero.
- **Primavera (MAM):** marzo, abril y mayo.
- **Verano (JJA):** junio, julio y agosto.
- **Otoño (SON):** septiembre, octubre y noviembre.

### 1.3.2. Variables extremas

Los eventos meteorológicos extremos no ocurren con frecuencia. Aún y así, son de especial interés debido al gran impacto que conllevan tanto para la sociedad como para el sector aeronáutico. Además, el análisis de extremos, es útil para mostrarnos aquellas zonas donde el clima presenta una diversidad meteorológica que excede los valores considerados como normales por AEMET [4].

Las variables extremas, extraídas de la base de datos de ECA&D [5], que se han usado en el estudio son:

**CDD.** Número de días máximos consecutivos calificados como secos y determinados bajo la condición:

$$CDD_{i,j} < 1 \text{ mm} \quad (1.4)$$

siendo  $CDD_{i,j}$  la precipitación para un día “i” en un periodo “j”.

**FG6Bft.** Número de días donde la media del viento diario registrado es igual o superior a los 6 Bft (10.8 m/s).

$$FG6Bft_{i,j} \geq 10,8 \text{ m/s} \quad (1.5)$$

siendo  $FG6Bft_{i,j}$  la magnitud que mide el viento medio para un día “i” de un periodo “j”.

Esta variable es importante para la aviación. Según recoge el ANEXO 14 de OACI (diseño y operaciones de un aeródromo en [8]) un viento que de media supere los 10 m/s (36 km/h) puede ser potencialmente peligroso a nivel operativo. En el estudio del emplazamiento de un aeródromo, el viento limitante para las operaciones de despegue o aterrizaje va sujeto al campo de referencia de aeródromo. Se establece que en circunstancias de operación nominal, se impide el aterrizaje o despegue de un avión si la componente transversal del viento excede de:

- 37 km/h (10,27 m/s) cuando se trata de aviones cuya longitud de campo de referencia es de 1500 m o más. Exceptuando, cuando se presenten con alguna frecuencia condiciones de eficacia de frenado deficiente en la pista debido a un insuficiente coeficiente de fricción longitudinal. En dicho caso debería suponerse una componente transversal del viento que no exceda de 24 km/h (6,67 m/s).
- 24 km/h (6,67 m/s) en el caso de aviones cuya longitud de campo de referencia es de 1200 m o mayor pero inferior a 1500 m.
- 19 km/h (5,27 m/s) en el caso de aviones cuya longitud de campo de referencia es inferior a 1200 m.

Por tanto, la variable  $FG6Bft$  tiene importancia en la composición e influencia sobre  $MI$ . En las estaciones donde se dé un elevado número de días en que la fuerza del viento supere el umbral de 10 m/s, los procedimientos aéreos pueden verse alterados o incluso impedidos en función del tipo de aeronave, la longitud del campo de referencia y la altitud de aeródromo, entre otros...

**ID “icy days”.** Número de días dentro de un periodo donde la temperatura diaria máxima es inferior a 0°C.

$$ID_{i,j} < 0 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (1.6)$$

siendo  $ID_{i,j}$  la temperatura máxima alcanzada para un día “i” de un periodo “j”.

**R20mm.** Número de días donde la precipitación en una zona determinada supera el umbral de los 20 mm de precipitación acumulada. Lo denotamos como:

$$R20mm_{i,j} \geq 20 \text{ mm} \quad (1.7)$$

siendo  $R20mm_{i,j}$  la precipitación para un día “i” en un periodo “j”.

El interés en el uso de esta variable reside en la gran variabilidad de la precipitación a lo largo del territorio español. Desde las zonas más áridas/desérticas, sin apenas precipitación acumulada (hacia la parte sur-este de castilla la macha y Almería) hasta zonas del Mediterráneo o la costa cántabra. En el caso de estas últimas, en ciertas épocas del año el umbral de 20 mm designado por  $R20mm$  se ve rebasado considerablemente por el carácter de las lluvias.

La cantidad de lluvia igual o superior al umbral de los 20mm puede afectar críticamente a la aviación, sobre todo en la visibilidad, si se da en un espacio corto de tiempo. Además, los sistemas de bajas presiones que generalmente causan dichas lluvias pueden conllevar otros efectos también adversos para los procedimientos aeronáuticos.

**SU.** Número de días en que la temperatura máxima diaria supera los 25 °C. Lo denotamos como:

$$SU_{i,j} > 25 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (1.8)$$

siendo  $SU_{i,j}$  en este caso es la temperatura máxima alcanzada en un día “i” de un periodo “j”.

**TR.** Número de días donde la temperatura mínima diaria es superior a los 20 °C. Esta variable indica el número de “noches tropicales”. Lo designamos como:

$$TR_{i,j} > 20 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (1.9)$$

donde  $TR_{i,j}$  es la temperatura mínima alcanzada en un día “i” de un periodo “j”.

Se han considerado variables relacionadas con temperatura, precipitación y viento para observar la variabilidad climática extrema. También hubiese sido interesante, incluso para el sector aeronáutico, disponer de variables que incluyeran diferentes tipos de precipitación: nieve, granizo, etc... pero estas variables no están disponibles en la base de datos de la ECA&D para todo el conjunto de estaciones consideradas. Este último hecho ha sido un factor limitante en la selección del conjunto total de variables que han conformado finalmente el análisis extremo.

En general, las variables relacionadas con la temperatura ( $TR$ ,  $SU$  e  $ID$ ) también inciden de manera directa en el sector aeronáutico. Las variables  $SU$  y  $TR$ , ambas relacionadas con temperaturas elevadas, podrían llegar a afectar al sector aeronáutico debido al impacto potencial sobre el cómputo de la temperatura de referencia de un aeródromo. Particularmente esto incide en el cálculo de la longitud de pista necesaria para un avión determinado en un aeropuerto. Además,  $ID$  la podemos relacionar de manera directa con la aparición de heladas. Este hecho también afecta de forma directa, y en ocasiones críticamente (engelamiento) a la aviación. Aún y así, las variables usadas en el  $MI$  extremo relacionadas con la temperatura, inciden con un impacto reducido en el sector aeronáutico en comparación con  $R20mm$  o  $FG6Bft$ . La consideración anterior es útil para diferenciar los  $MI$  a lo largo del territorio que puedan afectar de manera crítica al sector aeronáutico.

Para facilitar el análisis estacional de  $MI$ , en el Apéndice B-sección B.1, se analiza la climatología de España y las situaciones meteorológicas sinópticas predominantes en cada época del año. El conocimiento de las diferentes situaciones a lo largo del año nos permite relacionar cada una de ellas con el valor obtenido de  $MI$  en cada caso.

Por otro lado, en el Apéndice B, sección B.2 se exponen las distribuciones/tendencias de diferentes fenómenos meteorológicos relacionados con las variables seleccionadas (tanto para variables promedio como extremas en el periodo 1981-2010).

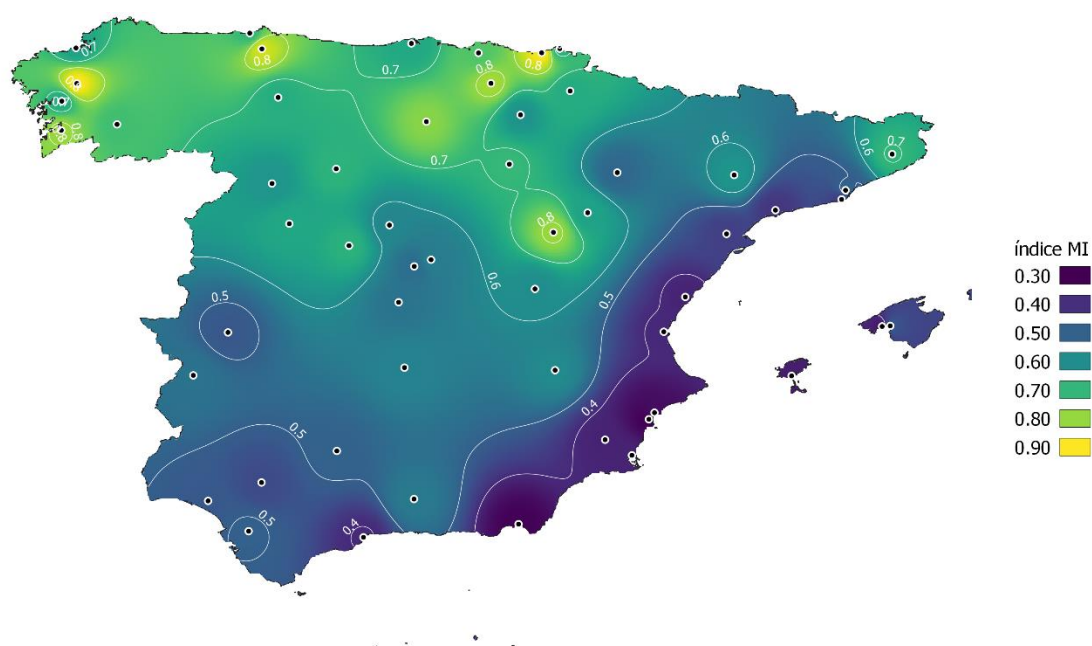
Por último y, previamente a llevar a cabo los análisis de  $MI$ , en el Apéndice-sección B.3, se encuentra la clasificación climática de Köppen del territorio español para el periodo 1981-2010. A lo largo del análisis, el conocimiento de esta distribución climática nos permite relacionar los diferentes climas con respecto a la variación de  $MI$ .

## CAPÍTULO 2. METEODIVERSIDAD A PARTIR DE VARIABLES PROMEDIO

A lo largo del capítulo se muestran los resultados de los valores de *MI* distribuidos geográficamente y calculados en base al promedio de las variables durante todo el periodo y por estaciones. La presentación del resultado se lleva a cabo mediante la exposición de mapas de interpolación obtenidos para variables promedio. Cada análisis se evalúa siguiendo las referencias de las variables y del clima mostradas en el Apéndice B.

### 2.1. *MI* a partir de variables promedio en el periodo 1981-2010

La Figura 2.1 muestra la distribución del promedio de *MI*, calculado a partir de las variables promedio, en el periodo 1981-2010 a lo largo de las estaciones mostradas en la Figura 1.2.



**Fig. 2.1** Distribución geográfica del promedio de *MI* a partir de variables promedio en el periodo 1981-2010.

Para la distribución de *MI* promediado durante el periodo (1981-2010), se usará la clasificación de Köppen (ver apéndice B, sección B.3) para relacionar cada tipología climática con el resultado de meteodiversidad expuesto en la Figura 2.1. La distribución climática de Köppen, presenta similitudes con la distribución geográfica de *MI*, por disponerse en base a umbrales de precipitación y temperatura.

Se puede observar cómo los valores máximos de *MI* se dan en el cuadrante noroeste peninsular, con valores comprendidos entre 0.80 y 1.00 según la Figura 2.1. El valor máximo de *MI* para todo el periodo se da en la estación meteorológica de Donostia con un valor de 0.88. Dicho cuadrante, dispone generalmente de un clima *Cfb/Csb* según la clasificación de Köppen (ver apéndice B, sección B.3, Figura B.20). *Cfb* es un clima marítimo que presenta inviernos fríos, veranos frescos y precipitaciones distribuidas a lo largo del año. La precipitación en forma de lluvia durante todo el año, el número de días de tormenta, de niebla y de helada, es lo que provoca que Donostia, bajo un clima *Cfb* disponga de un valor de *MI* alto.

Otros puntos del norte de peninsular como A Coruña o Bilbao, también con clima *Cfb* (ver apéndice B, sección B.3, Figura B.20) presentan valores altos de *MI* entorno a un valor 0.80. La cercanía con el Atlántico de todas las localidades anteriores supone un número bajo de días de helada y nieve de acuerdo con la distribución de estas variables que podemos ver en el Apéndice B (sección B.2, Figura B.10 y B.15 respectivamente).

En general, el norte español y el territorio colindante con el Atlántico, presentan una gran variedad climática que más tarde justificaremos a lo largo del apartado 2.2 para cada periodo estacional. Generalmente, las estaciones del tercio norte presentan un elevado número días de precipitación al año (*DR*, ver Apéndice B, sección B.2, Figura B.12), de días de tormenta (*DT*, ver Apéndice B, sección B.2, Figura B.14), de niebla (*DN*, ver Apéndice B, sección B.2, Figura B.16) y de helada (*DH*, ver Apéndice B, sección B.2, Figura B.10). También, aunque en menor magnitud con respecto al resto del territorio, presentan un moderado número de días despejados (*DD*, ver Apéndice B, sección B.2, Figura B.18) así como de horas de insolación (*I*, ver Apéndice B, sección B.2, Figura B.17). Este hecho provoca que *MI* sea constituido por la totalidad de las variables que lo componen aumentando el contraste climático y por ende el valor del índice.

En las mesetas *MI* se mantiene entre 0.50 y 0.60 como muestra la Figura 2.1. La metediversidad es más baja aquí debido principalmente a la disminución de los días de precipitación y de nieve según el Apéndice B (sección B.2, Figuras B.12 y B.16 respectivamente), y al aumento en las horas de sol y de cielo despejado (Apéndice B, sección B.2, Figura B.18 y B.17 respectivamente).

Cataluña, como podemos ver en la Figura B.20 del Apéndice B, sección 2.1, incluye dos zonas climáticas diferenciadas: (*Cfb-Cfa*) al norte y *Csa* a lo largo de la costa. Esto explica la diferencia de *MI* entre el extremo noreste de Catalunya y el resto del territorio. La influencia de los sistemas montañosos (e. g. Pirineos, Montseny, etc...) y la proximidad al golfo de León, donde se forman bajas presiones asociadas a la Tramontana, son factores que aumentan la diversidad en el extremo noreste peninsular. Los valores de *MI* del norte de Catalunya contrastan con respecto al resto de zonas mediterráneas, donde el valor de *MI* para el periodo es bajo.

A lo largo del mediterráneo, principalmente hacia el sur peninsular, la poca precipitación (o la concentración de ésta en épocas determinadas) sumada a la baja magnitud de las variables nieve, helada o niebla (ver Apéndice B, sección

B.2 Figuras B.12, B.10 y B.16 respectivamente) provocan que el valor de índice sea bajo. En estos casos, *MI* se conforma principalmente del número elevado de horas de sol (*I*) y de días despejados (*DD*) al año, según la distribución que se muestra en el Apéndice B, sección B.2 (Figuras B.17 y B.18 respectivamente).

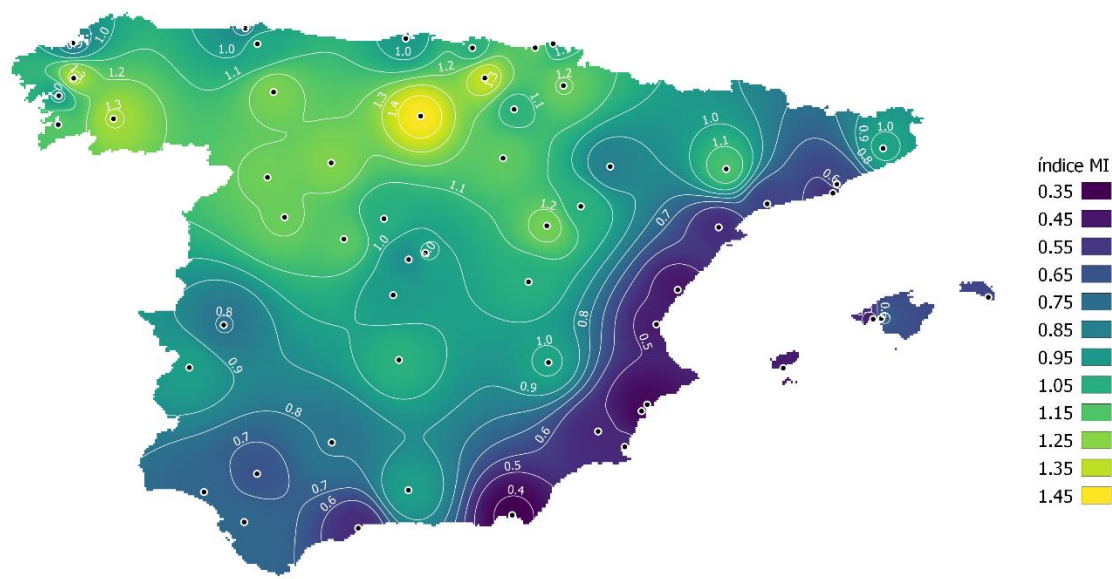
Los valores más bajos de *MI* se encuentran en el sureste peninsular: Almería y la región de Murcia registran valores de *MI* alrededor de 0.40 (ver Figura 2.1). Sobre este hecho, influye de manera directa un clima estepario cálido según la clasificación de Köppen que podemos ver en el Apéndice B, sección B.3. El clima estepario cálido (*BSh*) se caracteriza por inviernos suaves y veranos muy cálidos con precipitaciones anuales escasas que registran valores inferiores a la evapotranspiración potencial. Debido a este hecho, el valor de *MI* en estaciones bajo un clima *BSh* se constituye por un número muy elevado de horas de sol, así como de cielos despejados, obteniéndose un valor bajo de *MI*.

## **2.2. *MI* estacional a partir de variables promedio en el periodo 1981-2010**

Una vez analizada la distribución de *MI* promediado para todo el periodo 1981-2010, a continuación se analizan las distribuciones para cada estación. De esta manera, se profundiza en la distribución de *MI* con periodos más cortos ya que nos permiten relacionarlo con las situaciones atmosféricas a gran escala características de cada estación.

### **2.2.1. Meteodiversidad en invierno**

La Figura 2.2 muestra la distribución de *MI* a partir de las variables promedio durante el periodo 1981-2010 para el periodo invernal.



**Fig. 2.2** Distribución geográfica del promedio de  $MI$  en invierno a partir de variables promedio en el periodo 1981-2010.

Como se muestra en la Figura 2.2, para el periodo invernal los valores más bajos de  $MI$  ocurren a lo largo de la costa del mediterráneo, especialmente al sureste. Por otro lado, los valores más altos vuelven a situarse en el norte de la península, con Burgos como punto de máxima meteodiversidad.

Podemos relacionar el valor de  $MI$  con la situación meteorológica que se da para esta época del año en el territorio peninsular. Generalmente, el invierno está gobernado por la estabilidad atmosférica como consecuencia, sobre todo, de la situación del anticiclón continental europeo (ver Apéndice B, sección B.1.1).

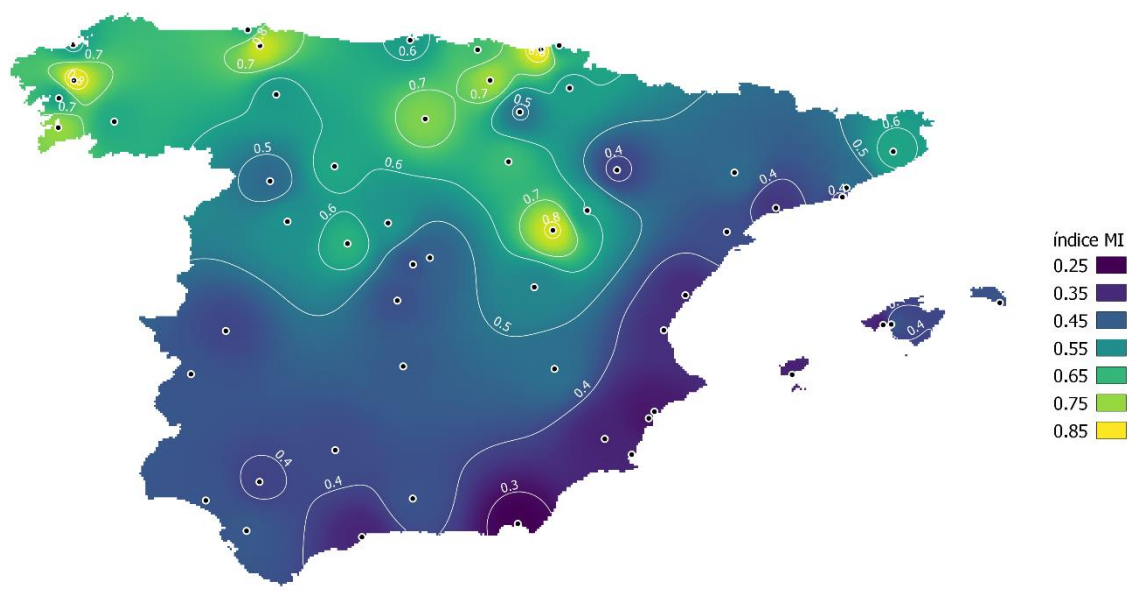
Los temporales de frío y nieve característicos de esta estación se producen cuando las bajas presiones de origen polar alcanzan la península por el noroeste. El tiempo de frío y nieve, descrito en el Apéndice B, en la sección B.1.2, es el causante del incremento de la diversidad meteorológica sobre el tercio norte peninsular. Las precipitaciones, en forma de lluvia y nieve (sobre todo en los principales sistemas orográficos) aumentarán las variables  $DR$  y  $DN$  respectivamente, así como  $DH$  y  $DT$ , aunque esta última menos común para esta época.

En definitiva, la entrada de bajas presiones por el noroeste español causa contrastes importantes en el valor de la meteodiversidad entre zonas del tercio norte y del sureste español. Las zonas de la mitad sur no se ven afectadas por las bajas presiones del noroeste por lo que disponen de una situación anticiclónica generalizada durante todo el invierno. El índice para el periodo invernal, presenta una gran amplitud entre su mínimo y su máximo debido a la variación en su composición fruto de la consideración anterior.



### 2.2.2. Meteodiversidad en primavera

La Figura 2.3 muestra la distribución de  $MI$  a partir de las variables promedio durante el periodo 1981-2010 para el periodo primaveral.



**Fig. 2.3** Distribución geográfica del promedio de  $MI$  en primavera a partir de variables promedio en el periodo 1981-2010.

Durante la primavera, a escala sinóptica, la situación anticiclónica predominante para la época invernal finaliza debido a la desaparición del anticiclón continental europeo (ver Apéndice B, sección B.1.6). Este hecho aumenta la probabilidad de que bajas presiones de latitudes mayores puedan afectar a latitudes menores, además de permitir la llegada de frentes activos del noroeste, que afectan a más regiones fuera del tercio norte peninsular.

A pesar de una afectación mayor de bajas presiones más allá del tercio norte, generalmente, los valores de  $MI$  son menores en cada estación con respecto a los expuestos en la Figura 2.2. En primavera, variables como  $DN$  y  $DH$  no influyen, exceptuando algún caso aislado, en el cálculo de  $MI$  a lo largo del territorio. Por tanto, la conformación del índice  $MI$  se lleva a cabo por un número menor variables en comparación con el caso invernal.

Por otro lado, las variables  $I$  y  $DD$  aumentan debido a la mayor insolación y número de días despejados para toda la península. Estas variables, según la sección B.2.6 del Apéndice B, se intensifican a medida que disminuimos en latitud. Consecuentemente, en zonas de la mitad sur peninsular  $MI$  depende principalmente de  $I$  y  $DD$  ya que variables como  $DR$ ,  $DH$ ,  $DT$  o  $DF$  presentan valores bajos. En la mitad sur peninsular la conformación del índice se produce entorno a un menor número de variables en comparación con el tercio norte peninsular.

A causa de la aparición de las bajas presiones, que pueden producir tormentas convectivas o ir asociadas a los frentes provenientes del noroeste, los valores de *DR* y *DT* aumentan principalmente en la mitad norte peninsular. Por esta razón, de nuevo observamos como los valores más elevados del índice se dan en zonas del cuadrante noroeste.

### 2.2.3. Meteodiversidad en verano

La Figura 2.4 muestra la distribución de *MI* a partir de las variables promedio durante el periodo 1981-2010 para el periodo estival.



**Fig. 2.4** Distribución geográfica del promedio de *MI* en verano a partir de variables promedio en el periodo 1981-2010.

Durante el verano se observa una menor diferencia entre los valores mínimos y máximos de *MI* (ver Figura 2.4). La Figura 2.3, para el caso primaveral, ya mostraba una disminución de la variabilidad con respecto a la época invernal por la menor amplitud entre los valores mínimos y máximos de *MI* obtenidos. La época estival acentúa este hecho debido a la uniformidad que caracteriza al clima a escala sinóptica para esta época del año.

El verano se caracteriza por la estabilidad atmosférica, las temperaturas altas y los cielos despejados a lo largo del territorio peninsular. Esto es debido a la presencia del anticiclón de las Azores que bloquea la entrada de frentes del oeste (ver apéndice B, la sección B.1.3). Dicha situación atmosférica a gran escala disminuye la diversidad y por consiguiente valores de *MI*.

Aún y así, debido al calentamiento de la superficie, se generan bajas presiones relativas que forman lo que se conoce como “baja térmica estival” (ver apéndice

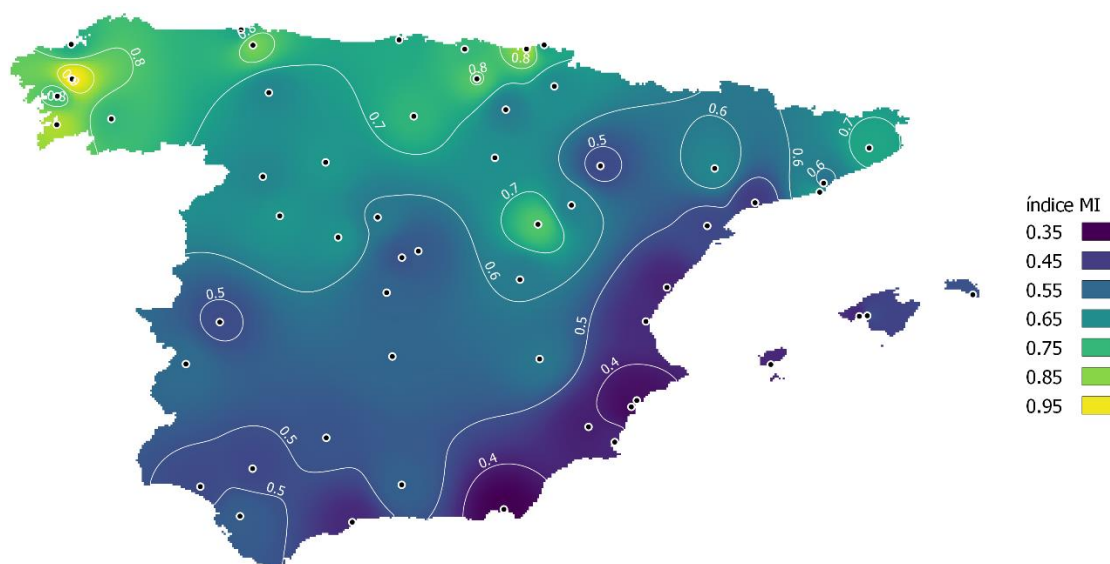
ver apéndice B, sección B.1.3 y Figura B.3). Las tormentas convectivas son características de las zonas montañosas de la mitad norte y de algunas zonas del interior peninsular. Este hecho, sumado a algún frente frío que pueda afectar ocasionalmente a la península por el extremo norte, provoca que la meteodiversidad pueda crecer de nuevo en esta zona. Esto es lo que sucede en zonas próximas a los Pirineos (Girona), zonas del Sistema Ibérico o puntos de la cornisa cantábrica. En estas zonas,  $MI$  depende de  $I$  y  $DD$ , pero también de las variables de precipitación ( $DR$ ) y tormenta ( $DT$ ).

Contrastando, los valores mínimos de meteodiversidad se dan en el sureste peninsular, donde se obtienen valores cercanos a 0.25 en la costa almeriense (ver Figura 2.4). Esta región, debido al clima estepario seco que la caracteriza (ver Apéndice B, sección B.3, Figura B.20) presenta valores muy bajos de todas las variables con excepción de  $I$  y  $DD$ .

La consideración anterior, se extiende prácticamente a toda el área peninsular con excepción del tercio norte (ver Figura 2.4). Dicha área presenta índices en torno a 0.30 basados en el valor elevado de  $I$  y  $DD$  en la conformación  $MI$ .

#### 2.2.4. Meteodiversidad en otoño

La Figura 2.5 muestra la distribución de  $MI$  a partir de las variables promedio durante el periodo 1981-2010 para el periodo otoñal.



**Fig. 2.5** Distribución geográfica del promedio de  $MI$  en otoño a partir de variables promedio en el periodo 1981-2010.

En esta época del año, las altas presiones dominantes en invierno y verano, que conducen estabilidad atmosférica, se desplazan hacia el sur permitiendo la entrada de frentes y bajas presiones por el norte y el noroeste. Debido a esto, se

producen temporales y tormentas que, en los meses más próximos al verano, pueden ser debidas a depresiones aisladas a niveles altos (DANA; ver Apéndice B, sección B.1.5) o relativas al temporal del noroeste (ver Apéndice B, sección B.1.4).

La inestabilidad que ocurre en otoño aumenta el valor de las variables usadas para calcular  $MI$  y por tanto la metediversidad. Por esa razón, de nuevo zonas del tercio norte español, sobre todo cercanas a la vertiente cantábrica, Galicia (debido a la entrada de frentes), o el noreste presentan un valor mayor de  $MI$  (ver Figura 2.5). En estas áreas, variables promedio relacionadas con la precipitación o la tormenta, así como los hidrometeoros en forma de nieve para cotas altas ( $DR$ ,  $DN$  y  $DT$  respectivamente) aumentan en valor a lo largo de este periodo interanual. Dicho aumento en las variables anteriores provoca un mayor contraste con respecto a las variables que conforman  $MI$ , aumentando su valor.

De nuevo, la mitad sur peninsular presenta valores de  $MI$  bajos como se muestra en la Figura 2.5. A esta consideración, se suma la excepción de zonas como Cádiz, donde ocasionalmente puede darse alguna baja presión desde el sureste, o la Comunidad Valenciana y Cataluña, donde la DANA puede producir fuertes tormentas en este periodo del año.

A continuación, se expondrán las conclusiones generales de la interpolación para variables promedio tomando consideraciones en cuanto a su valor y relacionándolas con la posible afectación para el sector aeronáutico.

## 2.3. Conclusiones

A lo largo de los apartados anteriores, se ha expuesto la distribución geográfica de  $MI$  promediada para todo el periodo y a nivel estacional. Para cada periodo estacional se ha justificado, en relación a las diferentes situaciones climáticas a gran escala para cada estación, como varían las variables que se usan en el cálculo de  $MI$ .

A nivel general,  $MI$  presenta un valor elevado en el tercio norte peninsular.  $MI$  disminuye tanto hacia el sur como hacia el este, presentando el valor mínimo para todos los casos analizados en Almería.

La diferencia entre el  $MI$  a nivel estacional y el  $MI$  para todo el periodo se caracteriza, por un lado, con la disminución del índice para cada periodo interanual con respecto a los valores de  $MI$  globales para todo el periodo. Por otro lado, durante los meses centrales del año, aquellos que comprenden las estaciones de primavera y verano, los valores de  $MI$  son similares en la mitad sur peninsular en todos los casos. La justificación de la variación y del valor de  $MI$  reside en la influencia de cada una de las variables que influyen en él ( $I$ ,  $DD$ ,  $DF$ ,  $DH$ ,  $DR$ ,  $DT$  y  $DN$ ) en función de la zona peninsular que analicemos.

$MI$  siempre depende del número de horas de sol diarias ( $I$ ) y del número de días despejados ( $DD$ ) ya que estas variables nunca son cero. Dichas variables,

únicamente varían en función de la latitud en la que nos encontremos (ver sección B.2.6 del Apéndice B) y acorde a las diferentes situaciones climatológicas en cada región de la península.

Además, la variable responsable de producir principalmente el contraste de valores de  $MI$  en España es el número de días de precipitación igual o superior a 1 mm ( $DR$ ). Denotamos así dicha variable ya que es la que cuantifica la aparición de frentes, bajas presiones y tormentas de manera claramente diferenciada en cada región de la Península Ibérica. La variable  $DR$ , disminuye de norte a sur y de oeste a este, por lo que en la diagonal imaginaria que une Galicia y Almería se produce un contraste pluviométrico (ver Apéndice B, sección B.2.2, Figura B.11). La magnitud de su valor, define principalmente las diferentes situaciones climáticas relacionadas con cada periodo interanual e influye notoriamente en el valor de  $MI$  por su elevado valor.

Las demás variables usadas para evaluar la meteo diversidad:  $DH$ ,  $DT$ ,  $DN$  y  $DF$  presentan valores menores al conformar el índice  $MI$ . La influencia en el índice de cada una de ellas, se suma a la influencia de  $DR$ ,  $I$  y  $DD$  para provocar los contrastes en el valor de  $MI$  a lo largo de la península.

En relación a la nieve, la distribución geográfica se limita a áreas de montaña o a zonas del interior continental en el norte español (ver el apéndice B, sección B.2.4). La variable  $DN$  no tiene gran importancia en el cómputo de  $MI$  ya que las estaciones consideradas (Figura 1.2) no se encuentran en las inmediaciones de sistemas orográficos.

El número de días con temperatura inferior a 0 °C (variable  $DH$ ) está relacionado con la temperatura mínima absoluta registrada (ver apéndice B, sección B.2.1, Figuras B.9 y B.10). Las heladas se concentran en el interior peninsular. En el litoral mediterráneo y el litoral sur Atlántico las heladas son poco frecuentes, e incluso, inexistentes. Por lo tanto,  $DH$  presenta valores altos en zonas de la meseta, Aragón u oeste de Catalunya. Esta variable explica los mayores valores de meteo diversidad en la meseta sur o interior catalán con respecto al sur peninsular o a la costa mediterránea, respectivamente.

El número de días de tormenta ( $DT$ ) influye en  $MI$  desde bien iniciada la primavera al otoño. En dicho periodo es cuando aumenta la probabilidad de la aparición de bajas presiones o frentes que provoquen tormentas como hemos visto a lo largo del análisis interanual (ver el Apéndice B, sección B.1.6).

Hemos justificado y relacionado  $MI$  con respecto a las variables promedio que lo conforman. Además, disponemos de las distribuciones geográficas del índice expuestas a lo largo del capítulo. Las distribuciones geográficas de  $MI$ , se ajustan con la presencia de las diferentes situaciones climáticas a gran escala expuestas en el Apéndice B, sección B.1. Además las distribuciones de las diferentes variables promedio que se exponen en la sección B.2 del Apéndice B, también se ajustan con las distribuciones geográficas de  $MI$  obtenidas. La magnitud de  $MI$ , por tanto, será la que nos proporcione la información correspondiente con las diversidad meteorológica de cada zona y la que nos permitirá evaluar las afectaciones con el sector aeronáutico.

En relación a la influencia en las operaciones aéreas, aquellas áreas con un valor de  $MI$  menor las relacionamos con ubicaciones donde los procedimientos se pueden llevar a cabo sin afectaciones o complicaciones. En estas áreas  $MI$  depende casi exclusivamente de  $I$  y  $DD$ , dando como resultado valores de  $MI$  bajos. Eso sí, aunque haya zonas del interior continental con bajo valor de metediversidad, un valor elevado de la variable promedio de niebla ( $DF$ ) puede dificultar las operaciones o procedimientos de aterrizaje.

En el norte español se dan valores altos de  $MI$  debido a la importancia de las precipitaciones en forma de lluvia o nieve, niebla y tormentas. En consecuencia, puede haber más riesgo en las operaciones aéreas. Estos valores de  $MI$  ocurren como consecuencia de las diferentes situaciones climáticas que se dan a lo largo del año.

Podemos concluir que los mapas de metediversidad de variables promedio nos ayudan a grandes rasgos a estimar la afectación en el sector aeronáutico en función de un mayor o menor valor de  $MI$ .

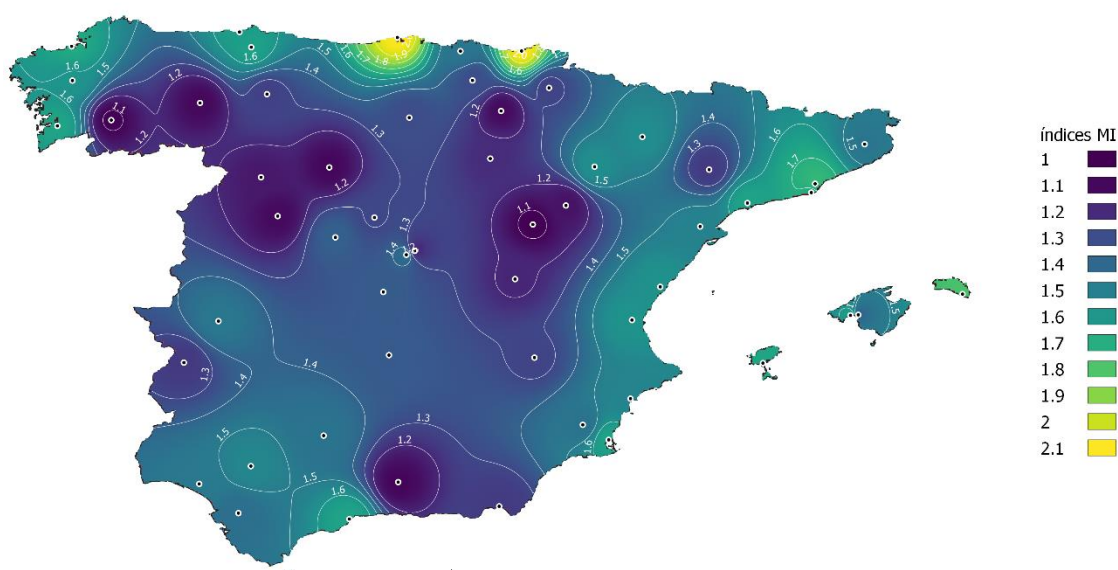
A continuación analizaremos la metediversidad usando las variables extremas contenidas en la base de datos de la ECA&D, que por su naturaleza, influyen en mayor medida en la aeronavegación.

## CAPÍTULO 3. METEODIVERSIDAD A PARTIR DE VARIABLES EXTREMAS

En el capítulo anterior, se ha analizado y evaluado la diversidad de los fenómenos usando variables promedio. En este capítulo se lleva a cabo un análisis similar pero considerando variables extremas. La diferencia e interés por este tipo de variables se basa en la menor frecuencia con la que ocurren y en su mayor excepcionalidad, en comparación con las variables promedio, siguiendo la línea expuesta a lo largo del proyecto. Estos hechos los veremos reflejados en la magnitud del índice y nos permitirán contemplar casos que pueden ser críticos para la aviación y que no contemplaríamos con el análisis de variables promedio.

### 3.1. *MI* en el periodo 1981-2010

La Figura 3.1 muestra la distribución del promedio de *MI*, calculado a partir de las variables extremas, en el periodo 1981-2010 a lo largo de las estaciones mostradas en la Figura 1.3.



**Fig. 3.1** Distribución geográfica del promedio de *MI* a partir de variables extremas en el periodo 1981-2010.

Como puede observarse en la Figura 3.1, los valores de *MI* obtenidos con variables extremas son mayores y presentan una variación mayor en el área estudiada en comparación a las variables promedio. Los índices *MI* extremos tienen un mayor valor absoluto además de disponer de una mayor amplitud (diferencia entre el valor máximo y mínimo). Este hecho provoca que en el mapa haya una mayor diferencia geográfica de “diversidad extrema” y un mayor contraste en la diversidad al considerar índices que se dan con poca regularidad.

*MI* presenta valores elevados a lo largo de la vertiente cantábrica, la costa gallega y la costa catalana.

En el norte español, la entrada de frentes y sistemas de bajas presiones incluso en épocas donde el resto de España está inmerso en un anticiclón (ver Apéndice B, sección B.1-B.1.6) produce valores elevados de la variable *R20mm* (ver Apéndice B, sección B.2.2, Figura B.13). La variable *CDD*, relacionada con la baja precipitación, también es importante a lo largo de la costa Atlántica según se muestra en el Apéndice B, Figura B.13. *CDD* contrasta con la variable *R20mm* aumentando el valor de *MI* para épocas más secas.

En el norte peninsular, en la costa catalana y la costa de Cádiz, la velocidad del viento puede ser elevada (ver apéndice B, sección B.2.7, Figura B.19). Esto hace que la variable *FG6Bft* aumente el valor de *MI* en estas zonas. Es importante mencionar que pese a que la variable *FG6Bft* presente una baja magnitud, el umbral en la velocidad del viento que marca es moderado a la hora de considerar y analizar un posible impacto sobre la aviación. Por tanto, el hecho de que una región tenga un valor mayor de *FG6Bft*, aunque no represente un porcentaje significativo del valor de *MI*, es algo a tener en cuenta desde el punto de vista aeronáutico.

La variable *ID* es prácticamente nula en buena parte de España con excepción de estaciones a lo largo de la meseta septentrional y algunas ubicaciones costeras como Donostia. Por otro lado, las noches tropicales (*TR*) apenas se dan a lo largo del tercio norte peninsular con excepción de tierras aragonesas y de Cataluña. La variable *SU* sí influye en el valor de *MI* en estaciones del norte peninsular.

En las mesetas, según muestra la Figura 3.1, *MI* presenta valores bajos ya que depende fundamentalmente de *ID* (meseta septentrional) en invierno y *SU* en verano. La precipitación en dichas áreas tiene poca importancia en el cálculo de *MI* por lo que la variable *CDD* también influye en *MI* a lo largo del año.

En la costa mediterránea, a causa de temporales desde el noreste, o del levante, y de las situaciones prolongadas de estabilidad en los meses centrales del año, variables como *R20mm*, *CDD* y *TR* en verano, influyen considerablemente en *MI*. Estas variables junto a *SU*, presente siempre durante los meses de calor y *FG6Bft* a lo largo de la costa catalana, producen un *MI* moderado. El valor de *FG6Bft* sobre la costa catalana se justifica con la aparición de vientos regionales como el Cierzo-Mistral o la Tramontana.

En conjunto, la costa Atlántica, como foco de mayor diversidad extrema, presenta valores de *MI* mayores si se usan variables extremas. Por el contrario, en general, en el resto del territorio presenta valores de *MI* extremo bajos en comparación con los valores de *MI* usando variables promedio.

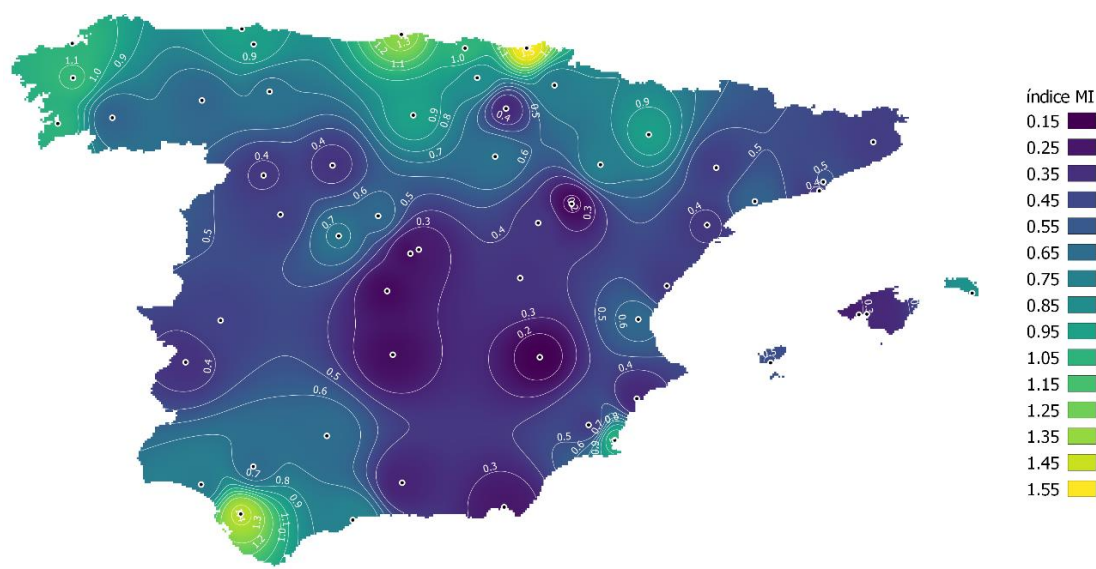


### 3.2. *MI* estacional a partir de variables extremas en el periodo 1981-2010

Del mismo modo que para el caso de variables promedio, con el análisis interanual se pretende profundizar en la distribución de *MI* para periodos estacionales. Estos periodos nos permiten relacionar las diferentes situaciones atmosféricas características de cada estación con la distribución geográfica de *MI*.

#### 3.2.1. Meteodiversidad en invierno

La Figura 3.2 muestra la distribución del promedio de *MI* para la primavera en el periodo 1981-2010 a partir de las variables extremas obtenidas en las estaciones mostradas en la Figura 1.3.



**Fig. 3.2** Distribución geográfica del promedio de *MI* en invierno a partir de variables extremas en el periodo 1981-2010.

Durante el periodo invernal, la península se ve inmersa en una situación de estabilidad generalizada. Con excepción a dicha situación, encontramos frentes que inciden a la península por el noroeste, produciendo temporales de frío y nieve. Estos frentes afectan generalmente al tercio norte español y generan inestabilidad localizada en los principales sistemas montañosos (ver Apéndice B, sección B.1.1-B.1.2).

Como nos muestra la Figura 3.2, en relación al periodo invernal, los valores más elevados de *MI* se dan a lo largo de la costa Atlántica. Estos valores son fruto de la aparición de los frentes descritos anteriormente y el contraste con los periodos anticiclónicos. La variación de *MI* entre el tercio norte y la meseta es brusco y

elevado en relación a su magnitud. La acción combinada del viento y el relieve provocan ascensos térmicos notables y descensos de la humedad a sotavento de las barreras orográficas. Este fenómeno se conoce como efecto Föhn (ver [9] para más detalles) y en España tiene una gran influencia en las condiciones climáticas de la cordillera Cantábrica.

Observando la Figura 3.2, la parte del centro peninsular presenta los menores valores de *MI* (situados entre 0.30 y 0.40). Dichos valores son bajos debido a insignificante magnitud de las variables de temperatura *SU* y *TR*, así como de las de viento (*FG6Bft*) y precipitación (*R20mm*). En estos casos el índice se constituye en base al valor de la variable de sequía *CDD*, justificada por la situación climática invernal de anticiclón generalizado. Esta justificación es válida también para el sur peninsular, excepto en un par de estaciones: Jerez y la base aérea de San Javier.

En general, las variables relacionadas con temperaturas elevadas (*SU* y *TR*), toman bajo o nulo valor en invierno. Aquellas estaciones en las que *MI* se constituye principalmente por estas variables presentan valores bajos del índice. Con excepción del tercio norte y de manera puntual Jerez y la base aérea de San Javier, *MI* dispone de valores bajos a lo largo del territorio.

Para aclarar las consideraciones en relación a las áreas y estaciones mencionadas anteriormente, la Tabla 3.1 muestra la magnitud de las variables que conforman *MI* en un conjunto de estaciones de interés.

**Tabla 3.1** Valor de las variables extremas y de *MI* para Jerez, San Javier, Donostia, Málaga y Madrid Barajas.

	<i>CDD</i>	<i>FG6Bft</i>	<i>ID</i>	<i>R20mm</i>	<i>SU</i>	<i>TR</i>	<i>MI</i>
<b>Jerez</b>	30.0	0.70	-	12.1	0.40	-	1.40
<b>San Javier</b>	23.1	0.67	-	3.50	0.06	-	1.00
<b>Donostia</b>	11.8	7.76	0.17	5.70	-	-	1.57
<b>Málaga</b>	25.8	1.07	-	3.43	0.27	-	0.29
<b>Madrid Barajas</b>	23.5	0.07	-	0.67	-	-	0.22

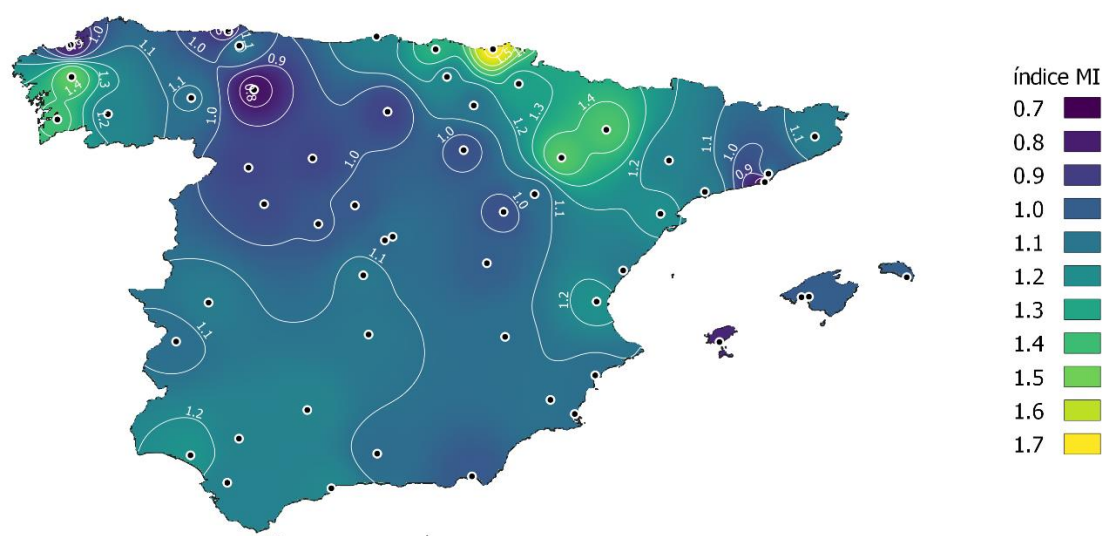
Como vemos en la Tabla 3.1, Jerez presenta un valor elevado de *MI* ya que únicamente dispone de dos variables nulas y altos valores de *CDD* y *R20mm*. Donostia presenta un valor alto de *MI* debido a la influencia de cinco variables, de las que destacamos la elevada magnitud de *FG6Bft*. Por el contrario, Málaga y Madrid presentan valores bajos de *MI* por depender fundamentalmente del valor elevado de *CDD* en la composición total del índice.

De nuevo, la costa Atlántica se presenta como foco de mayor diversidad extrema. En este caso, encontramos excepciones puntuales para el periodo invernal en Jerez y en la base aérea de San Javier. Estas estaciones disponen de un valor de *MI* mayor que para el caso invernal de variables promedio.

Por último, cabe destacar que en invierno, *MI* a partir de variables extremas presenta un amplio rango de valores en la distribución geográfica del índice (0.15-1.55). Este rango de valores es ligeramente mayor que para el caso de variables promedio (0.35 y 1.45) a lo largo del mismo periodo interanual.

### 3.2.2. Meteodiversidad en primavera

La Figura 3.3 muestra la distribución del promedio de *MI* para la primavera en el periodo 1981-2010 a partir de las variables extremas obtenidas en las estaciones mostradas en la Figura 1.3.



**Fig. 3.3** Distribución geográfica del promedio de *MI* en primavera a partir de variables extremas en el periodo 1981-2010.

La primavera es una época de variabilidad climática debido a las situaciones a gran escala tras la desaparición del anticiclón centroeuropeo. Este hecho, facilita la llegada de frentes fríos a la península, sobre todo desde el noroeste.

Precisamente, la Figura 3.3 nos muestra como durante la época primaveral, el valor de *MI* crece hasta 1.75 como valor máximo en Donostia. La primavera, favorece el aumento de cada una de las variables extremas consideradas. La variable *ID* presenta una excepción en la consideración anterior ya que disminuye a causa del incremento general de las temperaturas. Por este hecho, *MI* presenta valores en torno a la unidad en buena parte del territorio exceptuando Galicia, Donostia y el norte de Aragón, donde se supera este valor. La Tabla 3.2 muestra para algunas estaciones la magnitud de las variables que conforman la totalidad de *MI*.

**Tabla 3.2** Valor de las variables extremas y de *MI* para Vigo, Donostia, Zaragoza aeropuerto y Madrid Retiro.

	<i>CDD</i>	<i>FG6Bft</i>	<i>ID</i>	<i>R20mm</i>	<i>SU</i>	<i>TR</i>	<i>MI</i>
<b>Vigo</b>	15.3	0.07	-	6.06	4.50	0.03	1.41
<b>Donostia</b>	13.2	2.97	-	4.40	3.53	0.03	1.71
<b>Zaragoza aeropuerto</b>	24.6	3.87	-	1.13	17.7	0.03	1.45
<b>Madrid Retiro</b>	24.2	0.03	-	0.70	11.5	0.03	1.04

Como podemos observar en la Tabla 3.2, Madrid presenta un *MI* menor que el resto de estaciones debido a los valores bajos de las variables *FG6Bft* y *R20mm*, a pesar de presentar valores elevados de *CDD* y *SU*. En el resto del territorio del centro y sur peninsular, se da un comportamiento similar al de Madrid en la naturaleza de la composición del índice. Dicha situación comprende valores elevados de *CDD* y *SU* que contrastan con magnitudes bajas o nulas de *FG6Bft*, *R20mm*, *TR* e *ID*.

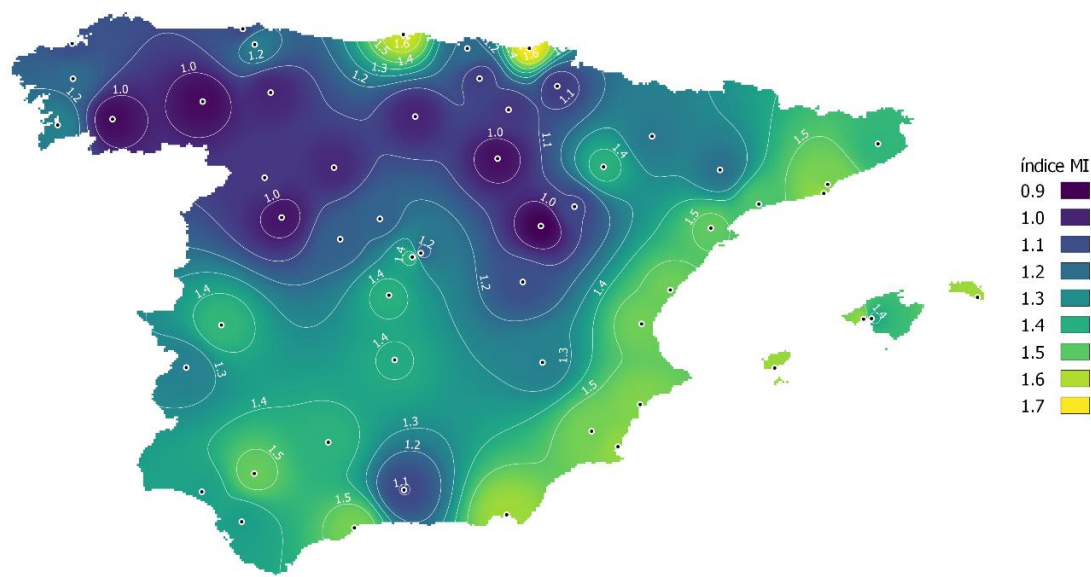
En esta época del año estaciones como Donostia, Zaragoza, la zona oeste de Aragón, Navarra y el País Vasco, presentan valores elevados de *FG6Bft*.

En definitiva y como muestra la Figura 3.3, se observa una región muy amplia en la península con baja meteodiversidad e idónea para las operaciones aeronáuticas. Por el contrario, el tercio norte sí que presenta zonas con elevada meteodiversidad. Algunas regiones a lo largo norte peninsular, además pueden ser críticas para la aviación debido al valor elevado *FG6Bft*.

De nuevo, para la primavera, los valores de *MI* obtenidos usando variables extremas son generalmente mayores en comparación al caso de variables promedio. De todos modos, a pesar de disponer un valor máximo en Donostia de 1.75, generalmente a lo largo del territorio se dan índices que apenas rebasan la unidad. La época primaveral evidencia la naturaleza y carácter de las variables extremas manifestando la diferencia geográfica (*MI* entre 1.00 y 1.70).

### 3.2.3. Meteodiversidad en verano

La Figura 3.4 muestra la distribución del promedio de *MI* para el verano en el periodo 1981-2010 a partir de las variables extremas obtenidas en las estaciones mostradas en la Figura 1.3.



**Fig. 3.4** Distribución geográfica del promedio de  $MI$  en verano a partir de variables extremas en el periodo 1981-2010.

El verano en la Península se caracteriza por la estabilidad atmosférica generalizada. Dicha estabilidad se da como consecuencia de la situación del anticiclón de las Azores, que evita la llegada de frentes desde el oeste (ver apéndice B, sección B.2.3). A pesar de esto, durante el verano la meteodiversidad es elevada como muestra la distribución de  $MI$  expuesta en la Figura 3.4. Este hecho se da a causa de la tipología de las variables que hemos considerado para el análisis extremo, relacionadas entorno a umbrales de precipitación y temperatura generalmente.

En esta estación del año, variables como  $SU$ ,  $TR$  y  $CDD$  aumentan a causa del aumento notorio en las temperaturas y la baja precipitación. Esto provoca valores moderados de  $MI$  que superan la unidad a lo largo de la península, aunque sin efectos potencialmente críticos para la aviación.

La situación de estabilidad puede desaparecer debido al calentamiento de la superficie produciendo sistemas convectivos aislados de baja presión (baja térmica estival, ver apéndice B, sección B.2.3, Figura B.3). Estas bajas presiones, se dan mayoritariamente a lo largo de la costa mediterránea y en los principales sistemas montañosos de la península. Las bajas presiones provocan un aumento de  $R20mm$  y de  $FG6Bft$ , aumentando el valor de  $MI$  respectivamente. Este hecho explica el valor de  $MI$  alrededor de 1.50 (ver Figura 3.4) a lo largo de toda la costa mediterránea y del sur peninsular. La Tabla 3.3 muestra la magnitud de las diferentes variables que componen  $MI$  para algunas estaciones seleccionadas.

**Tabla 3.3** Valor de las variables y de *MI* en las estaciones Barcelona-Fabra, Almería, Jerez, Burgos y Donostia.

	<i>CDD</i>	<i>FG6Bft</i>	<i>ID</i>	<i>R20mm</i>	<i>SU</i>	<i>TR</i>	<i>MI</i>
<b>Barcelona-Fabra</b>	34.4	0.50	-	2.00	3.40	0.23	1.54
<b>Almería</b>	75.3	0.33	-	0.07	85.1	60.5	1.58
<b>Jerez</b>	75.1	0.23	-	0.30	87.0	15.1	1.36
<b>Burgos</b>	30.1	0.10	-	0.63	55.2	0.07	1.01
<b>Donostia</b>	12.0	0.20	-	3.63	12.8	1.63	1.67

Como muestra la Tabla 3.3, en las estaciones de la mitad sur (Jerez y Almería) *MI* depende principalmente de *CDD*, *SU* y *TR*.

En Barcelona y en general a lo largo de la Costa Mediterránea *CDD*, *SU* y *TR* tienen valores menores con respecto a estaciones del sur peninsular. En el caso de Barcelona, los valores de *R20mm* y *FG6Bft*, debido a los fenómenos tormentosos, dan como resultado un valor de *MI* elevado.

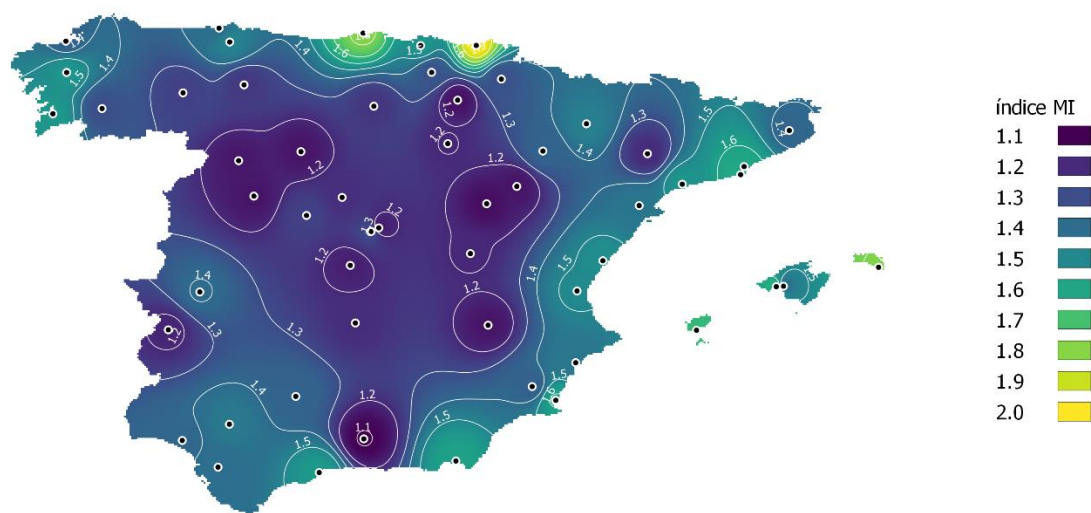
Burgos, como ejemplo de estación en la meseta norte, presenta el valor de *MI* más bajo. En este caso, las variables *CDD* y *SU* son elevadas debido a las fuertes temperaturas y a la baja precipitación. Por otro lado, los valores casi irrelevantes de *R20mm*, *TR* y *FG6Bft* constituyen el bajo valor del índice.

En Donostia y a lo largo de la vertiente Cantábrica, las bajas presiones ocasionales y la entrada de frentes fríos aislados por el noroeste (descritos en el Apéndice B, sección B.1.2 y representados por la Figura B.4) provocan un aumento en las variables *R20mm* y *FG6Bft*. Las situaciones anteriores contrastan con la situación anticiclónica generalizada a lo largo del verano. El aumento de *R20mm* y *FG6Bft*, sumado al menor de *CDD*, *SU* y *TR*, provocan valores elevados de *MI*.

Por la naturaleza de las variables extremas *CDD*, *TR* y *SU*, que influyen más en *MI* durante el periodo estival, el índice crece bruscamente en verano con respecto al caso de variables promedio. A esta consideración, hay que sumar la influencia de *R20mm* y *FG6Bft*, que en ocasiones de inestabilidad, contribuyen en el aumento del índice. A nivel general, se produce un gran contraste entre las costas y las zonas del interior, sobre todo a lo largo del Mediterráneo y del Atlántico.

### 3.2.4. Metediversidad en otoño

La Figura 3.5 muestra la distribución del promedio de *MI* para el otoño en el periodo 1981-2010 a partir de las variables extremas obtenidas en las estaciones mostradas en la Figura 1.3.



**Fig. 3.5** Distribución geográfica del promedio de *MI* en otoño a partir de variables extremas en el periodo 1981-2010.

Con la llegada del otoño, la situación generalizada de altas presiones llega a su fin. Otoño vuelve a ser una época de alta variabilidad climática debido a las situaciones a gran escala y los fenómenos meteorológicos adversos (ver apéndice B, sección B.1.4 a B.1.6). La llegada de frentes fríos a la península desde el noroeste, así como de temporales con origen en el mediterráneo o la aparición de una DANA, son situaciones que activan diversidad meteorológica. Por dichas razones, otoño presenta los valores de *MI* más elevados de todas las estaciones analizadas.

Al inicio de esta estación, las temperaturas son aún elevadas. En consecuencia, *MI* depende de los valores de las variables *CDD*, *TR* y *SU*. La aparición de sistemas de bajas presiones reduce el valor de las variables anteriores y por tanto de *MI* sobre todo en el tercio norte español y en el litoral mediterráneo. Por el contrario, las variables *R20mm*, *FG6Bft* e *ID* se incrementan provocando el aumento del índice

La Tabla 3.4 muestra el valor de las diferentes variables y de *MI* para algunas estaciones de interés en el análisis para el periodo otoñal.

**Tabla 3.4** Valor de las variables y de *MI* en las estaciones Donostia, Segovia, Almería y Barcelona-Fabra.

	<i>CDD</i>	<i>FG6Bft</i>	<i>ID</i>	<i>R20mm</i>	<i>SU</i>	<i>TR</i>	<i>MI</i>
<b>Donostia</b>	13.7	3.80	-	6.43	6.97	0.77	1.97
<b>Segovia</b>	18.0	0.13	0.03	0.60	15.0	0.33	1.22
<b>Almería</b>	35.0	0.40	-	0.80	39.3	17.1	1.59
<b>Barcelona-Fabra</b>	21.0	0.60	-	3.40	14.9	1.87	1.63



Tal y como muestra la Tabla 3.4, Donostia es la estación que mayor valor de *MI* presenta a causa de la magnitud de *R20mm* y *FG6Bft*. La magnitud elevada de estas variables sitúa a Donostia como área potencialmente crítica para el sector aeronáutico. El contraste con las variables *CDD*, *SU* y *TR*, relacionadas con periodos más estables climatológicamente, suponen un valor máximo de *MI* en esta región.

En áreas del centro peninsular, *MI* presenta valores cercanos a la unidad. Un ejemplo es Segovia (ver Tabla 3.4), cuyo valor de *MI* depende de las variables *CDD*, *SU*, *R20mm* y *TR* (aunque esta última con valor menor). Las variables de viento y lluvia presentan valores bajos. *MI* depende principalmente de las variables *CDD* y *SU* en su conformación, siendo un hecho positivo para el desarrollo de las operaciones aéreas.

En relación a las zonas del sur peninsular y el litoral mediterráneo, estas presentan valores de *MI* superiores a los del interior peninsular (ver Tabla 3.4). En Almería y en general el sureste peninsular, no existen periodos de inestabilidad tan frecuentes como en el tercio norte o en el litoral catalán. Este hecho, altera las diversas distribuciones en las temperaturas y precipitación como hemos ido viendo a lo largo del análisis en los diferentes apartados. El valor de *MI* para Almería y en general para la zona sur peninsular, está basado en los valores elevados de *CDD*, *SU* y *TR*, sumados a valores reducidos de *FG6Bft* y *R20mm*.

Barcelona presenta un valor similar de *MI* al de Almería (ver Tabla 3.4), basado en valores elevados de *CDD*, *SU* y *TR*. En este caso y a diferencia de Almería, la magnitud de *R20mm* es mayor. Con la llegada del otoño, en la costa catalana y la Costa del Azahar pueden aparecer sistemas de bajas presiones a nivel local que pueden producir tormentas. Pese a tener un valor de *MI* similar al de áreas del sur peninsular, la naturaleza de los periodos de inestabilidad, reflejados en la magnitud del *R20mm* y *FG6Bft*, puede ser crítica para el sector aeronáutico. A lo largo de la costa catalana y zonas del litoral mediterráneo como Castellón, Valencia y Alicante, las tormentas con la llegada del otoño son potencialmente peligrosas por la precipitación acumulada, las fuertes ráfagas de viento y la turbulencia producida en niveles altos.

El periodo otoñal presenta los valores más elevados de *MI* en relación a los análisis llevados a cabo para los casos estacionales del estudio de variables extremas.

### 3.3. Conclusiones

A lo largo de todo el trabajo hemos analizado *MI* usando dos tipos de variables diferentes: variables promedio y variables extremas. En cada uno de los casos se ha analizando el promedio de *MI* durante todo el periodo y a nivel estacional entre 1981 y 2010.



La obtención de la distribución de *MI* a lo largo del periodo 1981-2010 nos permite extraer generalidades sobre las áreas más críticas a tener en cuenta para el sector aeronáutico. Estas áreas, relacionadas con los valores más elevados de *MI*, serán zonas donde los procedimientos aeronáuticos se verán afectados con mayor frecuencia por adversidades meteorológicas.

En cada apartado se ha relacionado el valor de *MI* con las magnitudes de las variables que lo forman. De esta manera, hemos podido relacionar los valores del índice con el tipo de variables que más influye en su composición en cada caso. Esto nos ha permitido observar, más allá del valor numérico de *MI*, la relación y la peligrosidad con el sector aeronáutico. En todo momento se ha prestado atención a las variables más críticas en la influencia de las operaciones aeronáuticas (*FG6Bft* y *R20mm*). Posteriormente, en el capítulo 4, se profundizará en la evaluación de ubicaciones críticas en relación al sector aeronáutico. Podremos ver más en detalle cómo afectan dichas variables a *MI* en función de las áreas peninsulares y de los periodos interanuales.

Como hemos podido ver a lo largo de este capítulo, la distribución geográfica de *MI* obtenida presenta valores en todos los casos superiores a las distribuciones obtenidas para el caso de variables promedio. Además, *MI* para el caso de variables extremas, presenta un rango de valores mayor en todos los periodos estacionales a lo largo del área considerada.

En el análisis extremo, las variables relacionadas con las altas temperaturas (*SU* y *TR*) y con la baja precipitación (*CDD*) hacen que los valores más elevados de *MI* se den en estaciones diferentes en comparación con el caso promedio. Considerando variables extremas, los valores más elevados del índice se dan en otoño, primavera y verano debido a la mayor influencia en *MI* de las variables mencionadas anteriormente. En dichos periodos, será precisamente el contraste de dichas variables con las variables *R20mm* y *FG6Bft*, el que inducirá los valores mayores de *MI* a lo largo del territorio.

El índice de meteodiversidad en España para variables extremas está basado principalmente en las variables *CDD*, *SU* y *TR*. El valor de estas aumenta considerablemente durante los meses centrales del año, especialmente en la mitad sur peninsular y parte de la costa mediterránea. Sin embargo, en áreas donde *MI* depende principalmente de *CDD*, *SU* y *TR* y, en menor medida de *R20mm* y *FG6Bft*, no supone un problema para las operaciones aeronáuticas.

Podemos generalizar que los aeropuertos más estables y tranquilos, hablando en términos meteorológicos, se sitúan generalmente en la región sur peninsular (Castilla la Mancha, Extremadura y Andalucía). A la consideración anterior se le añade la excepción del suroeste español, como se ha podido ver en algunos casos a lo largo del análisis interanual (invierno, verano y otoño). A pesar de que el estudio no incluye estaciones en esta área, como la velocidad del viento puede ser elevada (ver Apéndice B, sección B.2.7, Figura B.19), es de esperar que aparezcan problemas en las operaciones aeronáuticas.

La influencia de *R20mm* en *MI* nos es de gran interés por tratarse de una variable que puede afectar a las operaciones aeronáuticas. La frecuencia de la

precipitación en gran parte de España, con excepción de Galicia, la franja cantábrica y el Pirineo, es relativamente baja. Por ese motivo, *R20mm* provoca diferencias significativas en el valor de *MI* extremo en diferentes regiones de España.

En relación a las temperaturas en España, el umbral de los 40°C se sobrepasa cada verano en puntos de Andalucía (Sevilla, Córdoba, etc...) así como en otros puntos de la mitad Sur Española. El territorio español presenta una amplia diversidad en relación a las temperaturas. Por ese motivo, incluso en ubicaciones a lo largo del tercio norte, se dan altas temperaturas durante los meses centrales del año. El contraste de las altas temperaturas en estaciones como Donostia o Bilbao con los demás fenómenos meteorológicos que considera *MI*, induce índices elevados.

Las temperaturas extremas influyen en el sector aeronáutico (ver [10]). Sin embargo, las altas temperaturas registradas en España no supondrían, a priori, un peligro para llevar a cabo procedimientos de aterrizaje/despegue. El dimensionamiento de las pistas llevado a cabo por el Anexo 14 de OACI [8], considera una media climática de las temperaturas más calurosas. Esto da como resultado una longitud un tanto sobredimensionada por construirse en base a las temperaturas máximas del lugar en un largo periodo de tiempo y para el avión más restrictivo.

Las temperaturas extremas presentan problemas cuando son de carácter puntual, por ejemplo las relacionadas con una ola de calor. Si se dan temperaturas superiores a las máximas consideradas en la obtención de la temperatura de referencia de aeródromo, los procedimientos de aterrizaje/despegue pueden verse alterados (como en el caso de [10]).

El caso de Sevilla y el valle del Guadalquivir puede ser crítico en relación a la consideración anterior sobre las altas temperaturas. Aun y así, un aumento puntual para un año en concreto, no se vería reflejado en la obtención de *MI* por tratarse precisamente de un hecho puntual.

En las estaciones del extremo norte peninsular, *MI* se conforma por la totalidad de las variables consideradas a lo largo del año. Valores elevados de *FG6Bft*, fruto de las brisas, los frentes o la orografía, sumados a valores elevados de *R20mm*, provocan que esta área sea crítica para el sector aeronáutico. Los aeropuertos más complejos en relación a su variabilidad climática se dan a lo largo del tercio norte español. Bilbao, problemático por la presencia de viento cruzado [11], A Coruña y Barcelona son aeropuertos donde *MI* cobra mayor importancia por las variables que conforman el índice en cada caso. En el capítulo 4, se analizará con mayor detalle el *MI* de los aeropuertos mencionados con la finalidad de referenciar en el índice los eventos meteorológicos adversos de dichos aeropuertos.

Por otro lado, los valores más bajos de *MI* a partir de variables extremas se obtienen a lo largo de la meseta norte. Esta área presenta valores de *CDD*, *SU*, *TR*, *R20mm* y *FG6Bft* generalmente menores a todas las estaciones tanto del sur como de la cornisa cantábrica.

El interior de la península presenta una mayor estabilidad en su clima y en definitiva menores complicaciones, justificadas con los valores de  $MI$ , para el desarrollo de procedimientos aeronáuticos. Para completar la consideración anterior, deberá evaluarse cada caso individualmente. Pueden darse casos, como Madrid-Barajas, donde la orografía juega un papel importante en los eventos meteorológicos. En estos casos, deberá estudiarse con detenimiento el carácter de los fenómenos y su relación con las variables usadas para calcular  $MI$  en el caso extremo.

A lo largo del mediterráneo, los valores de  $MI$  son parecidos a los del sur peninsular.  $MI$  aumenta con la llegada del buen tiempo por el aumento de  $CDD$ ,  $SU$  y  $TR$  y presenta un máximo a finales verano debido a las tormentas que aumentan los valores de  $R20mm$  y  $FG6Bft$ . El análisis de meteodiversidad de variables extremas difiere con el de variables normales en las regiones de menor  $MI$ . En el capítulo 2 vimos como las regiones a lo largo del sur peninsular disponían de los valores más bajos de  $MI$ . Este hecho se da como consecuencia únicamente de la naturaleza de las variables usadas en la obtención de cada uno de los índices. El análisis de variables extremas, contempla diversos eventos climáticos relacionados con las altas temperaturas y la sequía. Por tratarse de eventos que constituyen de igual manera  $MI$ , obtendremos índices mayores en lugares donde dichas variables crezcan en magnitud.

En el noreste peninsular los valores de  $MI$  obtenidos contrastan según se dispongan en áreas de interior o cercanas al Mediterráneo. A lo largo de las estaciones costeras, el calor, la sequía, el viento, la precipitación y las tormentas contrastan en la composición de  $MI$  a lo largo del año. En estas zonas, obtenemos valores más elevados del índice en diversos periodos interanuales en comparación con las zonas del interior como Lleida. Los inviernos fríos, el clima seco y el nulo o leve viento, provocan  $MI$  menores similares a los obtenidos en las mesetas.

En definitiva, el estudio de variables extremas nos sirve para tener una idea de cómo la meteodiversidad podría afectar directamente a la aviación al depender  $MI$  de variables ( $R20mm$  y  $FG6Bft$  en nuestro caso) que pueden alterar las operaciones aeronáuticas.

El análisis en la meteodiversidad puede cuantificar cuan diversa es una región en función de las variables que influyan en  $MI$ . Podemos calcular  $MI$  con las variables que más se ajusten a nuestra hipótesis en cada caso o situación. En términos de meteodiversidad extrema, la ECA&D dispone de un conjunto elevado de variables de carácter extremo donde a parte de las consideradas en el presente trabajo, podemos encontrar una serie de variables de carácter relativo basadas en percentiles. Dicha serie va algo más allá en cuanto a la complejidad de análisis, ya que refiere a extremos basados con respecto a la propia serie. La consideración e introducción de esta tipología de variables podría ser objeto de estudio para casos venideros siguiendo la línea establecida a lo largo de este proyecto.

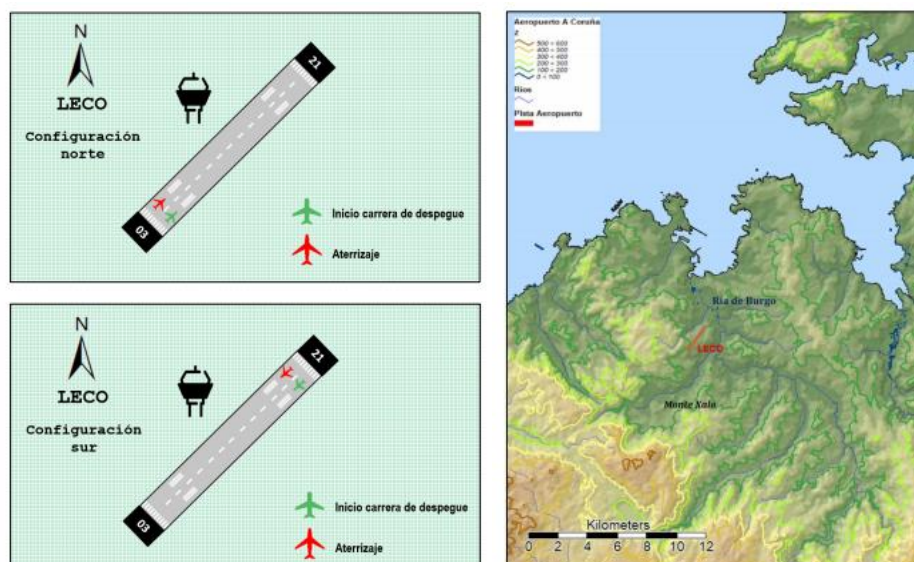
## CAPÍTULO 4. GUÍAS METEOROLÓGICAS DE AERÓDROMO Y *MI*

Con la finalidad de realizar un análisis más detallado del efecto de *MI* sobre las operaciones aéreas, se han analizado los cuatro aeropuertos españoles que disponen de guía meteorológica de aeródromo por AEMET (ver [12]): A Coruña, Adolfo Suárez Madrid-Barajas, Bilbao y Josep Tarradellas Barcelona-El Prat. Con el fin de observar si la influencia de las variables consideradas en *MI* se ajusta con las situaciones expuestas en las guías de cada aeropuerto, se evaluará en cada caso la contribución en el índice de las diferentes variables promedio y extremas.

Los cuatro aeropuertos anteriores, con excepción de Madrid, se sitúan en las zonas con *MI* más elevado, tanto para variables promedio como extremas. Este hecho ratifica la conclusión extraída en los capítulos anteriores en relación a que los aeropuertos más allá del tercio norte español, reúnen buenas condiciones de operatividad.

### 4.1. A Coruña. LECO

El aeropuerto de A Coruña se localiza en la localidad de Culleredo. Está situado en una pequeña meseta a unos 100 metros sobre el nivel del mar rodeado de montes de orografía suave. En la Figura 4.1 se muestra la situación del aeropuerto así como la configuración de la pista.

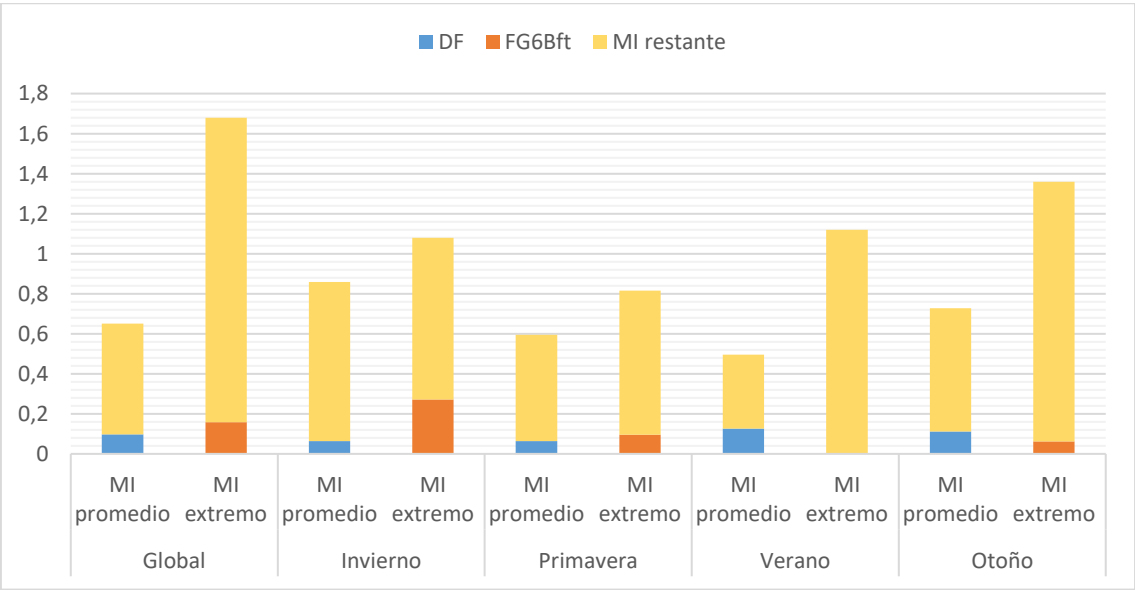


**Fig. 4.1** Configuración de pistas (izquierda) y situación geográfica del aeropuerto de LECO (derecha). Fuente [13].

En LECO, los fenómenos meteorológicos adversos capaces de alterar la regularidad en las operaciones aeronáuticas convencionales son el viento, principalmente del norte/noroeste, y la niebla. Las nieblas ocurren normalmente durante el verano así como a principios de otoño. Pueden ser de radiación en condiciones anticiclónicas o de advección debido a la acción combinada del océano, como fuente de humedad y al viento.

Para evaluar los fenómenos anteriores a lo largo del periodo 1981-2010, se analizará la influencia de *DF* y *FG6Bft* en el *MI* global y por estaciones. Esta información se contrastará con los periodos que la guía meteorológica [14] considera más habituales en relación a cada fenómeno.

La Figura 4.2 muestra gráfica y numéricamente la contribución de las variables anteriores en el *MI* global (promedio a lo largo de todo el periodo) y por estaciones. En cada caso las variables se relacionan con el estudio de *MI* al que pertenecen, promedio o extremo. La Tabla 4.1 muestra la contribución de cada variable expuesta en la Figura 4.2, expresada en porcentaje, al valor de *MI*. La magnitud absoluta de las variables se muestra en la tabla C.1 Apéndice C.



**Fig. 4.2** Contribución de las variables *DF* y *FG6Bft* en el *MI* global y estacional para LECO.

**Tabla 4.1** Contribución a *MI* (en %) de las variables *DF* y *FG6Bft* para LECO.

LECO	global	invierno	primavera	verano	otoño
<i>DF</i>	14.8	7.4	10.8	25.3	15.2
<i>FG6Bft</i>	9.4	25.0	11.7	-	4.6

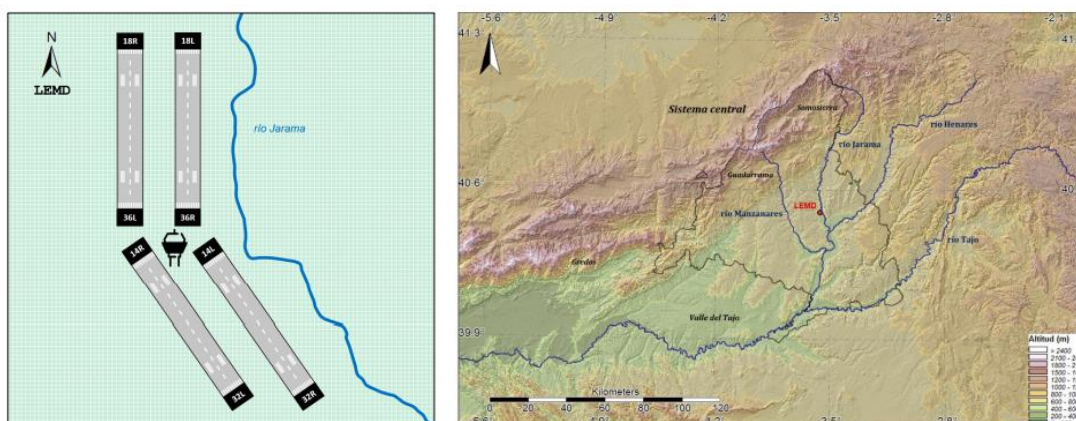
La Figura 4.2 nos proporciona la contribución de *FG6Bft* a lo largo del año para el *MI* extremo. *FG6Bft* supone un 9.4 % de *MI* a nivel global según nos muestra la Tabla 4.1. Durante el invierno es cuando la contribución es mayor, según observamos gráficamente en la Figura 4.2, representando un 25.0 % del valor total de *MI*. En general *FG6Bft* se incrementa para los meses de invierno debido a la entrada de frentes fríos, siguiendo la situación que recoge la guía meteorológica [13].

La Figura 4.2 nos muestra la influencia de la niebla en *MI* a lo largo de los diversos periodos. En porcentaje, *DF* supone un 14.8 % del *MI* a nivel global según muestra la Tabla 4.1. Verano y otoño son las estaciones en que la variable contribuye más en *MI* con un 25.3 % y un 15.2 %, respectivamente según la Tabla 4.1. *DF* tiene una magnitud de 17.6 días y de 10.0 días, respectivamente, para las estaciones anteriores según el Apéndice C, Tabla C.1. Estas estaciones coinciden con los periodos en los que la guía meteorológica [13] indica en relación a la mayor frecuencia de periodos con baja visibilidad.

Para el caso de LECO, podemos concluir que los eventos y fenómenos meteorológicos que la guía meteorológica de AEMET [13] recoge, se ajustan con el porcentaje en que las variables mostradas en la Tabla 4.1 y la Figura 4.2 influyen sobre *MI*.

## 4.2. Adolfo Suárez Madrid-Barajas. LEMD

LEMD se sitúa en la vertiente meridional de la Sierra de Guadarrama a una altitud media de 600 metros. La influencia del macizo montañoso en el clima del aeropuerto es decisiva y repercute de manera directa sobre las operaciones. En la Figura 4.3 se muestra la situación del aeropuerto así como las configuraciones de la pista.

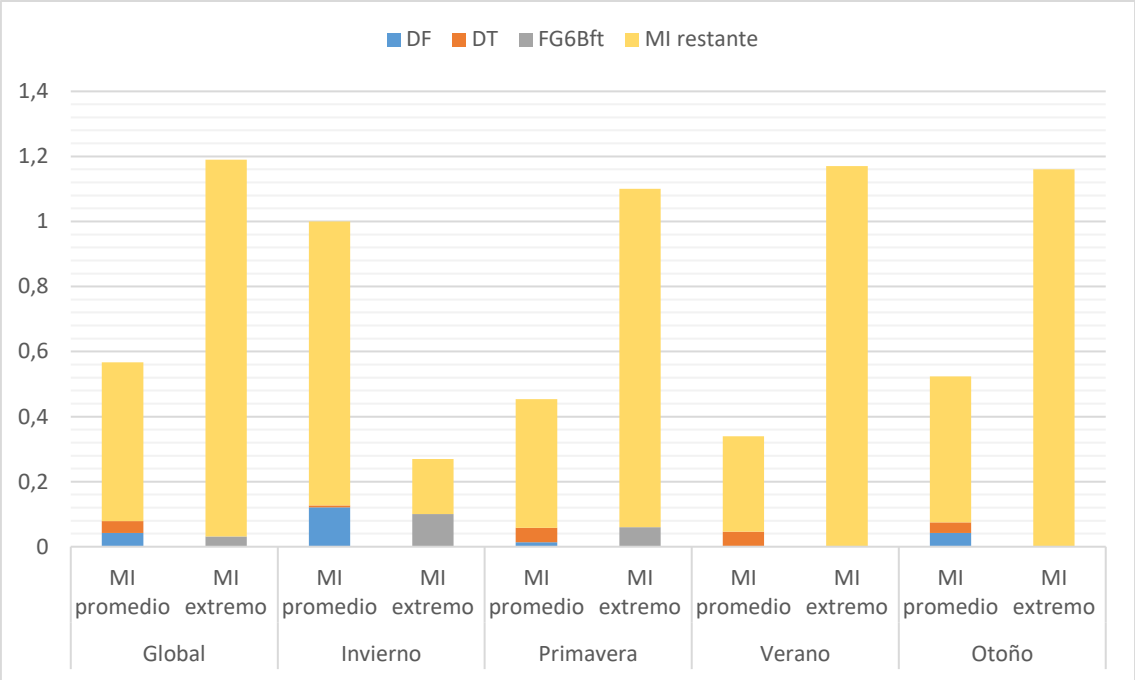


**Fig. 4.3** Configuración de pistas (izquierda) y situación geográfica del aeropuerto de LEMD (derecha). Fuente [14].

Los fenómenos que potencialmente afectan el entorno operativo de LEMD son: la brisa de montaña, la cizalladura del viento, la niebla y la nieve. Esta última variable la descartamos por darse únicamente 2.6 días al año para el caso promedio en el periodo 1981-2010, afectando insignificadamente al valor *MI*.

Los fenómenos anteriores los podemos relacionar con las variables *FG6Bft*, *DF* y *DT* del cálculo de *MI*.

De la misma manera que para el caso anterior, la Figura 4.4 muestra gráfica y numéricamente la contribución de las variables anteriores en el *MI* global y por estaciones. En cada caso las variables se relacionan con el estudio de *MI* al que pertenecen, promedio o extremo. La Tabla 4.2 muestra la contribución de cada variable expuesta en la Figura 4.4, expresada en porcentaje, al valor de *MI*. La magnitud absoluta de las variables se muestra en la tabla C.2 Apéndice C.



**Fig. 4.4** Contribución de las variables *DF*, *DT* y *FG6Bft* en el *MI* global y estacional para LEMD.

**Tabla 4.2** Contribución a *MI* (en %) de las variables *DF*, *DT* y *FG6Bft* para LEMD.

LEMD	anual	invierno	primavera	verano	otoño
<i>DF</i>	7.1	12.0	3.1	0.23	8.0
<i>DT</i>	6.2	0.6	9.7	13.2	6.3
<i>FG6Bft</i>	2.6	37.0	5.5	-	-



La Figura 4.4 nos muestra la contribución de las variables *DT* y *DF* en el *MI* promedio a lo largo de los diversos periodos. Generalmente, la influencia de estas no es significativa tras observar la gráfica. Porcentualmente vemos como la contribución al valor de *MI* global expuesto en la Tabla 4.2 es leve. *DF* y *DT* constituyen un 7.1% y un 6.2 %, respectivamente, del valor total de *MI* (ver Tabla 4.2). En el caso de Madrid-Barajas para variables promedio, *MI* depende fundamentalmente de las variables *I* y *DD* en su composición. A la conclusión anterior, extraída del capítulo 2, podemos agregar que *DF* y *DT* no son sustanciales en el *MI* global tras observar los bajos porcentajes con los que influye sobre el índice. Por tanto, las variables *I* y *DD* componen casi en su totalidad el *MI* restante de cada periodo expuesto en la Figura 4.4.

En relación a los periodos estacionales, la contribución de *DF* aumenta en invierno (12.0 %) y la de *DT* en verano (13.2 %) según la Tabla 4.2 y tras observar la Figura 4.4. Tales porcentajes se deben a las tormentas durante los meses más centrales y a las nieblas durante el periodo invernal, respectivamente. Los porcentajes estacionales relativos a la niebla y tormenta, varían ajustándose a los periodos que describe la guía [14] para dichos fenómenos.

La variable *FG6Bft*, encargada de contabilizar aquellos días donde la velocidad del viento supera los 10.8 m/s (20.99 kn), representa un umbral elevado. Aeronaves como el A320 presentan un límite operacional de 10 kn para la cabecera 21 de LEMD según la guía [14]. Siguiendo esta información, la variable no contabilizaría la totalidad de las situaciones en las que el factor viento provoca afectaciones sobre LEMD pero si aquellas en las se muestra como más crítico.

La Figura 4.4 nos muestra a nivel global como *FG6Bft* representa una magnitud baja del total de *MI* que se corresponde solamente con un 2.6 % del total del índice según la Tabla 4.2. En invierno, buena parte del *MI* está constituido por *FG6Bft* según nos muestra gráficamente la Figura 4.4. Para dicha estación, el porcentaje en la composición aumenta hasta el 37.0 % según la Tabla 4.2.

El viento en LEMD aumenta en magnitud para la época invernal según la Tabla C.2 del Apéndice C. El resto del año influye leve o nulumamente en el valor de *MI*. La contribución de *FG6Bft* es cero para verano y otoño por lo que *MI* depende de variables extremas que no afectan a la aviación como *CDD*, *SU* y *TR*.

En relación a los fenómenos de viento, la brisa de montaña y la cizalladura según la guía [14], se dan a lo largo de todo el año. En el caso de la primera, la mayor frecuencia se da para los meses de mayor insolación. En este caso, el valor de *FG6Bft* no muestra la influencia de dichas brisas en el valor de *MI* ya que no dispone de magnitud en los meses más centrales. Aún y así, según expresa la guía [14], la magnitud de las brisas de montaña de mayor intensidad se dan alrededor de los 15 kn. Este valor, por tanto, no lo recogería el umbral descrito por la variable *FG6Bft*.

La cizalladura en LEMD se da como consecuencia de las tormentas de naturaleza orográfica y por el viento fuerte del oeste. Las tormentas, por un lado, se dan sobre todo con la llegada del otoño. Según observamos en la Figura 4.4, en el *MI* extremo de verano y otoño no influye la variable *FG6Bft*. Por tanto, la

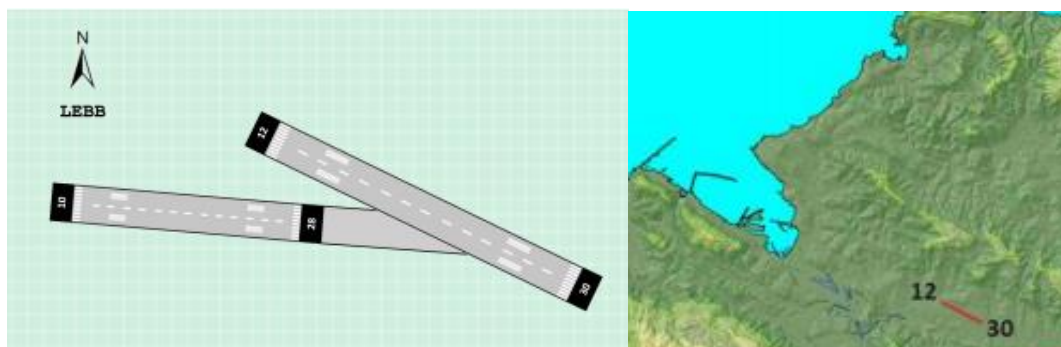


esta variable no describe las situaciones de cizalladura relacionadas con los periodos de tormentas, o el valor de la magnitud de viento es menor al del umbral de dicha variable.

Por otro lado, el viento sinóptico fuerte del oeste cobra fuerza sobre todo en los meses de otoño e invierno. Dicho viento se ajusta con el temporal del noroeste y el temporal de frío y nieve descrito en el Apéndice B, sección B.1.2-B.1.4. En este caso, la influencia de *FG6Bft* en la composición de *MI* durante el periodo invernal se ajustaría a tal situación descrita por la guía [14].

### 4.3. Bilbao. LEBB

Por su situación geográfica (Figura 4.5) el aeropuerto de Bilbao (LEBB) ha sido objeto de muchas noticias en relación a las operaciones de aterrizaje/despegue más bruscas que se han visto en España [11]. El aeropuerto se sitúa en el centro del Valle de Asúa, de orientación noroeste-sureste, a escasos 9 kilómetros de la desembocadura de la Ría del Nervión. El valle de Asúa colinda con el mar en la parte más occidental y se cierra por su otro extremo con una sucesión de montes y valles que configuran una zona de gran variabilidad orográfica.



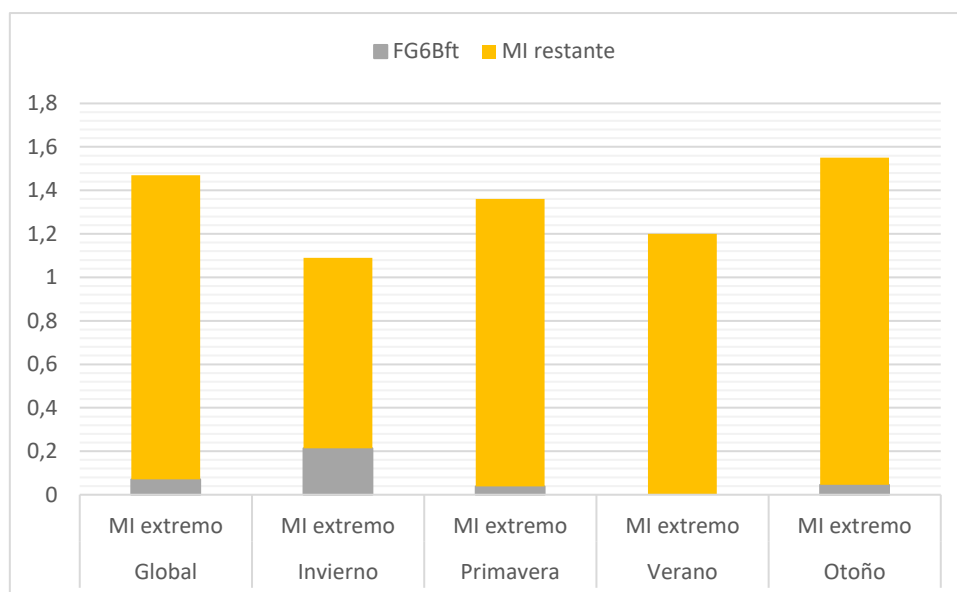
**Fig. 4.5** Configuración de pistas (izquierda) y situación geográfica del aeropuerto de LEBB (derecha). Fuente [15].

La cizalladura y la turbulencia son los fenómenos con mayor impacto en las operaciones para el aeropuerto de Bilbao. Estos fenómenos son los causantes principales de una media aproximada de 65 operaciones frustradas al año (ver [15]). Dichos fenómenos se producen principalmente debido al forzamiento orográfico del valle en el que el aeropuerto está situado, cuando el viento (de carácter moderado-fuerte) a escala sinóptica es de componente sur.

En este caso, la cizalladura y la turbulencia están relacionados con la variable extrema *FG6Bft* y su respectiva contribución a *MI*.

La Figura 4.6 muestra gráfica y numéricamente la contribución de las variables anteriores en el *MI* global y por estaciones. En cada caso las variables se relacionan con el estudio de *MI* al que pertenecen, promedio o extremo. La Tabla

4.3 muestra la contribución de cada variable expuesta en la Figura 4.6, expresada en porcentaje, al valor de *MI*. La magnitud absoluta de las variables se muestra en la tabla C.3 Apéndice C.



**Fig. 4.6** Contribución de la variable *FG6Bft* en el *MI* global y estacional para LEBB.

**Tabla 4.3** Contribución a *MI* (en %) de la variable *FG6Bft* para LEBB.

LEBB	anual	invierno	primavera	verano	otoño
<b><i>FG6Bft</i></b>	4.8	19.6	2.9	-	2.9

La Figura 4.6 nos muestra como a nivel global para el promedio de todo el periodo, *FG6Bft* no influye de manera significativa sobre el total de *MI*. Según muestra la Tabla 4.3, para la totalidad del periodo analizado, *FG6Bft* supone el 4.8 % del valor de *MI*. La fuerza del viento, mostrada exclusivamente bajo el umbral de *FG6Bft*, es insignificante a nivel global para todo el periodo analizado.

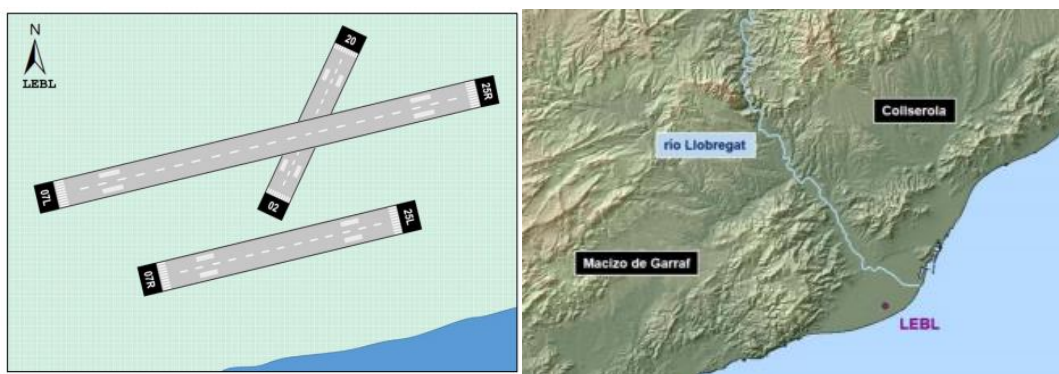
Aún y así, la distribución de *MI* por estaciones coincide con el periodo relacionado con la mayor frecuencia en la turbulencia y cizalladura según la guía [15]. La Tabla 4.3 nos muestra como la variable supone el 19.6 % del *MI* invernal. Por tanto, en esta estación pueden darse afectaciones críticas en las operaciones por viento. De todos modos, debido a su elevado umbral, como ya se mencionó para el caso de LEMD, *FG6Bft* no contabiliza la totalidad de las situaciones del factor viento.

El mayor valor de viento para el periodo invernal está relacionado con la existencia de frentes y sistemas de bajas presiones que afectan desde el noroeste (ver Apéndice B, sección B.1.2-B.1.4). Dichas situaciones climáticas,

son las responsables de la magnitud y dirección del viento, en los meses más fríos del año, que provocan los fenómenos de cizalladura y turbulencia.

#### 4.4. Josep Tarradellas Barcelona-El Prat. LEBL

El aeropuerto de Josep Tarradellas Barcelona-El Prat está situado en las inmediaciones del delta del río Llobregat, a unos escasos 10 kilómetros al sudoeste de Barcelona. El aeropuerto se encuentra rodeado orográficamente por el macizo del Garraf y la Sierra de Collserola, separados por la influencia del valle del Llobregat. Esta situación a nivel de emplazamiento, presenta ventajas como la poca pendiente media a lo largo del aeropuerto al estar situado en un delta. En la Figura 4.7 se muestra la situación del aeropuerto, así como las configuraciones de la pista.

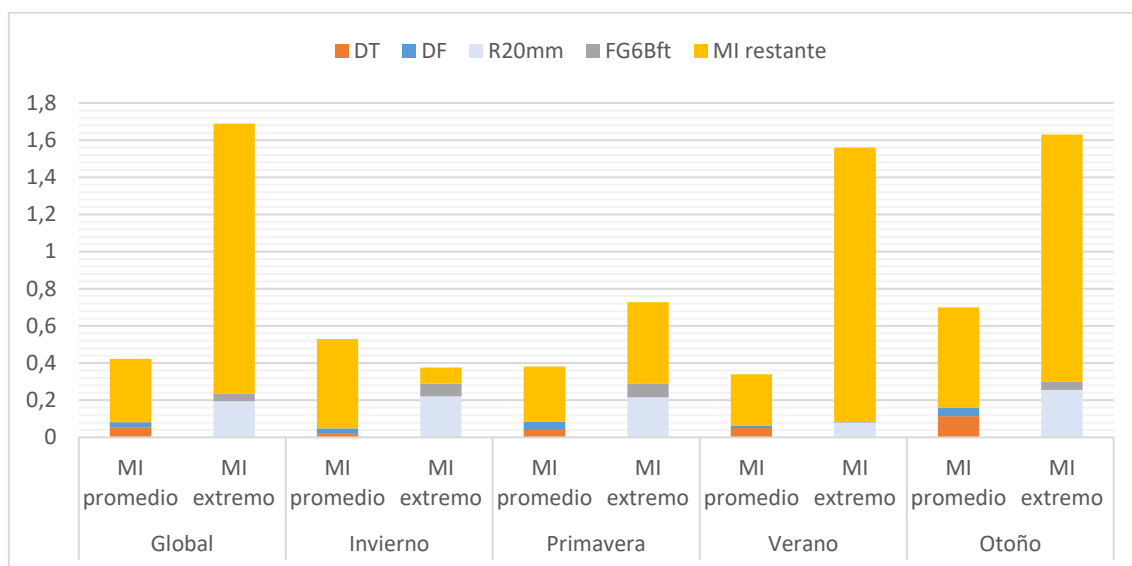


**Fig. 4.7** Configuración de pistas (izquierda) y situación geográfica del aeropuerto de LEBL (derecha). Fuente [16].

A lo largo del año existen diferentes fenómenos meteorológicos que pueden alterar las operaciones tanto a nivel local (aterrizaje/despegue) como a nivel TMA (aproximación/salida). Tales fenómenos, descritos detalladamente en [16], se asocian con la brisa marítima, la cizalladura a causa de diversos factores, la visibilidad y la lluvia torrencial cálida.

Para evaluar los fenómenos comentados se han considerado las variables promedio  $DF$  y  $DT$ , relacionadas con la niebla (reducción en la visibilidad) y con las tormentas respectivamente. Por otro lado, se analizarán las variables extremas  $R20mm$  y  $FG6Bft$  para evaluar los umbrales de lluvia y viento respectivamente

La Figura 4.8 muestra gráfica y numéricamente la contribución de las variables anteriores en el  $MI$  global y por estaciones. En cada caso las variables se relacionan con el estudio de  $MI$  al que pertenecen, promedio o extremo. La Tabla 4.4 muestra la contribución de cada variable expuesta en la Figura 4.8, expresada en porcentaje, al valor de  $MI$ . La magnitud absoluta de las variables se muestra en la tabla C.4 Apéndice C.



**Fig. 4.8** Contribución de las variables *DT*, *DF*, *R20mm* y *FG6Bft* en el *MI* global y estacional para LEBL.

**Tabla 4.4** Contribución a *MI* (en %) de las variables *DT*, *DF*, *R20mm* y *FG6Bft* para LEBL.

LEBL	anual	invierno	primavera	verano	otoño
<b><i>DT</i></b>	12.2	3.7	10.4	14.9	16.4
<b><i>DF</i></b>	6.7	5.6	11.5	3.5	6.5
<b><i>R20mm</i></b>	11.5	58.6	29.8	5.0	15.6
<b><i>FG6Bft</i></b>	2.3	18.4	9.8	0.2	2.7

La precipitación extrema, designada por la variable *R20mm*, puede alterar gravemente las operaciones aéreas en un entorno como el de Barcelona-El Prat tal y como se presenta en la guía [16]. La Figura 4.8 nos muestra como dicha variable influye similarmente en la totalidad del *MI* global y estacional extremo a lo largo del año. Para invierno y primavera, según expone la Figura 4.8, la influencia de *R20mm* es muy significativa en la composición del índice pudiendo conllevar alteraciones en las operaciones.

Si observamos la Tabla 4.4, *R20mm* supone un 11.5 % de *MI* durante el periodo de estudio. Dicho porcentaje, representa un valor elevado ya que como vimos a lo largo del análisis del capítulo 3, *MI* depende principalmente de *TR*, *SU* y *CDD* en su conformación global.

En la Tabla 4.4 observamos cómo en invierno *R20mm* representa un 58.6 %, y en primavera un 29.8 %. Para el periodo estival, el porcentaje baja a 5.0 % y vuelve a presentar un valor moderado en otoño con 15.6 %. Para invierno y primavera, la variable *R20mm* supone un porcentaje mayor del valor de *MI*

debido a la mínima aportación de *TR*, *SU* e incluso *ID*. Por lo tanto, dentro de los eventos meteorológicos que *MI* incluye, la precipitación mayor a 20 mm presenta un mayor peso. En verano y otoño, la contribución de *R20mm* a *MI* disminuye, aumentando el de las variables *CDD*, *TR* y *SU*. Los *MI* extremos crecen debido al aumento de las variables anteriores como se expone en la Figura 4.8. Sin embargo, estas últimas variables, pese a aumentar el índice en dichos periodos, no suponen un peligro para el desarrollo de las operaciones aéreas.

Si observamos la magnitud absoluta de la variable para cada estación (ver Apéndice C, Tabla C.4) vemos como la variable es máxima en otoño, con 3.58 días, seguida por el verano con 1.83 días así como 1.47 y 1.37 días respectivamente para invierno y primavera.

Con la llegada del otoño, las temperaturas disminuyen durante la estación y las variables *SU* y *TR* disminuyen su influencia en *MI*. Durante este periodo, tal y como la guía [16] describe, es cuando se producen la mayor cantidad de tormentas y donde el *R20mm* presenta un valor mayor. Esta variable representa un 15.6 % (ver Tabla 4.4), menor que en el caso de invierno y primavera. Aún y así, debido al porcentaje que presenta, deberá tenerse en cuenta a la hora de evaluar los efectos adversos que puede conllevar en las operaciones aéreas.

La magnitud de *FG6Bft* se mantiene constante a lo largo del año mostrando un leve aumento para las estaciones de verano y otoño según podemos ver en la Tabla C.4 del Apéndice C. Generalmente, la influencia en la totalidad del *MI* extremo a lo largo de los diferentes periodos es baja tal y como describe la Figura 4.8. La mayor contribución de esta variable al valor de *MI* se da en invierno (suponiendo un 18.4 % del valor de *MI* según la Tabla 4.4). Vemos cómo pese a mantener una magnitud constante durante todo el año, los porcentajes varían de una estación a otra. De nuevo este hecho se da como consecuencia del aumento en la contribución de *MI* de las variables *SU*, *TR* y *CDD* en los meses más centrales. Con excepción del invierno, la variable *FG6Bft* influye insignificamente en la composición de *MI* a lo largo de los diferentes periodos interanuales según se expone en la Figura 4.8.

Como describe la guía [16] las tormentas son la principal causa de cizalladura para LEBL. La variable *DT* es mayor en verano y otoño, periodos donde las tormentas pueden afectar críticamente a la aviación [16] (ver Tabla C.4 del Apéndice C). Como podemos ver en la Tabla 4.4, *DT* supone un 12.2 % del total de *MI*, mientras que para verano y otoño un 14.9 % y un 16.4 %, respectivamente. La Figura 4.8 muestra gráficamente como la variable contribuye mayormente en *MI* en las estaciones mencionadas. Durante estas estaciones se pueden dar tormentas que afecten críticamente a las operaciones aéreas debido a la cizalladura que pueden llevar asociadas. En [17] podemos observar un episodio que se dio el 10 de septiembre de 2017 en relación a los fenómenos comentados.

El impacto por baja visibilidad causada nieblas en Barcelona-El Prat, se da mayoritariamente para las estaciones de primavera y verano según [16]. Generalmente, el porcentaje con el que la variable *DF* (ver Tabla 4.4) contribuye a *MI* es bajo a lo largo del año por lo que afectaría únicamente en casos

singulares. Para el caso primaveral y coincidiendo con la información que presenta la guía, la variable  $DF$  representa un 11.5 % del valor de  $MI$ . De todos modos, los episodios de niebla pueden ser más frecuentes, aunque sin llegar a una alteración crítica en las operaciones, por la tipología de dichas nieblas (ver guía [16]).

## REFERENCIAS

- [1] Significados, *Diversidad*, acceso 26/02/2020, [online]. Disponible en: <https://www.significados.com/diversidad/>
- [2] Mazón J., Pino D., "Meteodiversity: A new concept for quantifying meteorological diversity", *Weather*, vol.72, nº 5, pp 143-145, 2017.
- [3] World Meteorological Organization, *Frequently asked questions*, acceso 27/02/2020, [online]. Disponible en: [http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/ccl/faq/faq\\_doc\\_en.html](http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/ccl/faq/faq_doc_en.html)
- [4] AEMET, *Base de datos de Valores promedio normales*, acceso 11/02/2020, [online]. Disponible en: <http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/datosclimatologicos/valoresclimatologicos>
- [5] ECA&D, *European Climate Assessment & Dataset*, acceso 11/03/2020, [online]. Disponible en: <http://www.ecad.eu/>
- [6] Shannon CE, "A mathematical theory of communication", *Bell Syst*, vol 27, pp 379-423, 1948.
- [7] QGIS, *download page*, acceso 15/02/2020, [online]. Disponible en: <https://www.qgis.org/es/site/forusers/download.html>
- [8] Anexo 14 al Convenio sobre aviación civil internacional. Aeródromos, volumen 1, séptima edición, acceso 25/03/2020, [online]. Disponible en: <https://www.anac.gov.ar/anac/web/uploads/normativa/anexos-oaci/anexo-14-vol-i.pdf>
- [9] Instituto nacional de información geográfica (CNIG), *Efecto Föhn*, acceso 20/04/2020, [online]. Disponible en: [https://www.ign.es/espmmap/figuras\\_clima\\_bach/Clima\\_fig\\_03.htm](https://www.ign.es/espmmap/figuras_clima_bach/Clima_fig_03.htm)
- [10] Tiempo.com, *¿Por qué a los aviones les cuesta más despegar en verano?*, acceso 03/05/2020, [online]. Disponible en: <https://www.tiempo.com/noticias/ciencia/por-que-a-los-aviones-les-cuesta-mas-despegar-en-verano.html>
- [11] La vanguardia, *El difícil aterrizaje de un avión en el aeropuerto de Bilbao por el viento*, acceso 04/05/2020, [online]. Disponible en: <https://www.lavanguardia.com/vida/20191220/472368784057/aterrizaje-avion-aeropuerto-bilbao.html>
- [12] AEMET, *Guías meteorológicas de aeródromo*, acceso 24/05/2020, [online]. Disponible en: [http://www.aemet.es/es/conocermas/aeronautica/detalles/Guias\\_aerodromo](http://www.aemet.es/es/conocermas/aeronautica/detalles/Guias_aerodromo)



- [13] AEMET, *Guía meteorológica del A Coruña*, acceso 24/05/2020, [online]. Disponible en: <https://doi.org/10.31978/639-18-064-7.LECO>
- [14] AEMET, *Guía meteorológica de Adolfo Suárez Madrid-Barajas*, acceso 24/05/2020, [online]. Disponible en: <https://doi.org/10.31978/639-18-065-2.LEMD>
- [15] AEMET, *Guía meteorológica de Bilbao*, acceso 24/05/2020, [online]. Disponible en: <https://doi.org/10.31978/639-18-066-8.LEBB>
- [16] AEMET, *Guía meteorológica de Josep Tarradellas Barcelona-El Prat*, acceso 24/05/2020, [online]. Disponible en: <https://doi.org/10.31978/639-19-016-3>
- [17] AEMET, *La cizalladura en el aeropuerto de Barcelona: episodio del 10 de septiembre de 2017*, acceso 18/06/2020, [online]. Disponible en: <https://doi.org/10.31978/639-19-002-X>
- [18] Meghan Walter, "Mapping precipitation: Analysis of GIS interpolation techniques", Tufts University, Department of Civil and Environmental Engineering, 2011.
- [19] F.-W. Chen and C.-W. Liu, "Estimation of the Spatial Rainfall Distribution Using Inverse Distance Weighting (IDW) in the Middle of Taiwan", *Paddy and Water Environment*, vol. 10, nº 3, pp 209-222, 2012.
- [20] Dewi Hartkamp A., De Beurs K., Stein A., W. White J., *Interpolation Techniques for Climate Variables*, CIMMYT, Wageningen (The Netherlands), 1999.
- [21] J. Noori M., H. Hassan H., T. Mustafa Y., "Spatial Estimation of Rainfall Distribution and Its Classification in Duhok Governorate Using GIS", *Journal of Water Resource and Protection*, vol. 6, pp 75-82, 2014.
- [22] Instituto nacional de información geográfica (CNIG), *Atlas nacional del clima*, acceso 01/04/2020, [online]. Disponible en: <http://atlasnacional.ign.es/wane/Clima>
- [23] Instituto nacional de información geográfica (CNIG), *Tipos de tiempo*, acceso 01/04/2020, [online]. Disponible en: [https://www.ign.es/espmmap/figuras\\_clima\\_bach/Clima\\_fig\\_09.html](https://www.ign.es/espmmap/figuras_clima_bach/Clima_fig_09.html)
- [24] Clima en Mapas, *Mapas y gráficos climatológicos*, acceso 11/04/2020, [online]. Disponible en: <https://climaenmapas.blogspot.com/p/pagina-anual.html>
- [25] Capel Molina J. J., "El Clima de la Península Ibérica", *Investigaciones geográficas*, nº 25, pp 197-199, 2001.



- [26] Serrano-Notivoli R., Beguería S., De Luis M., Tejedor E., Longares L.A. , “Tendencias recientes de los eventos de precipitación diaria y extrema en España (1950-2012)”, Universidad de Zaragoza, Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio, 2012.
- [27] Meteosim Truewind (varios autores), *Atlas Eólico de España. Estudio técnico PER 2011-2020*, Instituto para la diversificación y ahorro de la energía, 2011.

## APÉNDICE A

### A.1. Método de la distancia inversa ponderada (IDW)

El método de la distancia inversa ponderada es uno de los métodos más usados a nivel global para llevar a cabo la interpolación espacial de una variable. Concretamente, este método ha demostrado un excelente funcionamiento y adaptación para la interpolación de variables meteorológicas y climáticas (ver [18] y [19]).

En [18] podemos observar como el método de la distancia inversa ponderada (IDW) presenta mayor exactitud (con respecto a métodos como el Spline o el Krigging) cuando se evalúa el resultado con el error cuadrático medio (RMSE). El estudio (ver [18]) se llevó a cabo para una serie de datos de valores medios de precipitación distribuidos a lo largo de diversas estaciones meteorológicas de EEUU. El rango temporal también se corresponde con un periodo total de treinta años, por lo que observamos una clara analogía frente a nuestro proyecto en varios puntos.

A nivel general, el método se basa en la disminución de la influencia de un punto en relación a la distancia con el punto de magnitud desconocida deseado. Este método matemático usa una función inversa de la distancia bajo la consideración de que puntos cercanos son puntos “parecidos” y con mayor influencia sobre el punto de magnitud desconocida que queremos estimar. Matemáticamente lo definimos como la suma ponderada de los valores de  $N$  (en 1.4) puntos conocidos:

$$Z(S_0) = \sum_{i=1}^N \alpha_i \cdot Z(S_i) \quad (\text{A.1})$$

donde  $Z(S_0)$  representa el valor a estimar,  $N$  el número de muestras alrededor del punto que queremos estimar,  $Z(S_i)$  hace referencia a los valores que hemos medido y  $\alpha_i$  se refiere a los pesos asignados a cada punto de su alrededor. Para el cálculo de los pesos  $\alpha_i$  definimos la siguiente expresión:

$$\alpha_i = \frac{d_{io}^{-p}}{\sum_{i=1}^N d_{io}^{-p}} \quad (\text{A.2})$$

donde  $d$  es la distancia entre el punto a estimar y  $(S_0)$  el de datos de la muestra  $(S_i)$ .  $P$  es un factor que contempla la reducción de peso, de ahí su valor negativo, ya que minimiza el error cuadrático medio. En este punto, también

podemos concluir que es un método determinista, a diferencia de Krigging, ya que no usa criterios estadísticos para determinar los factores de peso. Más detalles en [20].

Como ya se ha visto para [18], una de las ventajas que posee este método es la posible evaluación de su precisión mediante el error cuadrático medio (RMSE). El RSME se encarga de medir las diferencias entre los valores pronosticados (o estimados) por un modelo y los valores realmente observados del objeto a modelar/estimar. Se define como:

$$RMSE_i = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (R_i(t) - Rm_i)^2}{n}} \geq 0 \quad (\text{A.3})$$

donde  $Rm_i$  son los diferentes valores de la variable espacial interpolada usando el IDW para una estación  $i$ . Por otro lado  $R_i(t)$  hace referencia a los datos observados en la estación de estudio  $i$ .

La elección de este método se determinó por la exactitud que presenta frente a otros métodos también deterministas, como el TIN o Splines (este último no disponible en QGIS) en medición de variables similares a nuestro caso. Frente a métodos estocásticos, donde la repartición de los pesos se realiza mediante variogramas, como es Krigging, también demuestra buena exactitud. Este último, pese a que generalmente también describe un buen comportamiento, requiere requisitos computacionales elevados y presenta una mayor complicidad en su aplicación que no se ve compensada en los resultados obtenidos.

### A.1.1.IDW en QGIS

Una vez definido y justificado el método a usar, a continuación se presenta una evaluación pertinente del método IDW en QGIS para corroborar su correcto funcionamiento.

Para llevar a cabo la interpolación, QGIS nos presenta una configuración con una serie de variables/parámetros a modificar. Primeramente, debemos definir un parámetro o coeficiente de distancia que nos definirá el índice de nuestra interpolación. Esta magnitud, hace referencia a la ponderación dada por la distancia, elemento que ya vimos que caracterizaba al método IDW en su previa definición (el peso definido en A.2).

En este caso, se recomienda usar valores bajos comprendidos entre 1 y 5 (ver [21] página 77). Mediante la variación de este parámetro, hemos establecido un IDW de índice 3. Por otro lado, debemos definir el tamaño del píxel y ajustarlo a la capa vectorial de superficie que en nuestro caso es la Península Ibérica y Baleares.

## APÉNDICE B

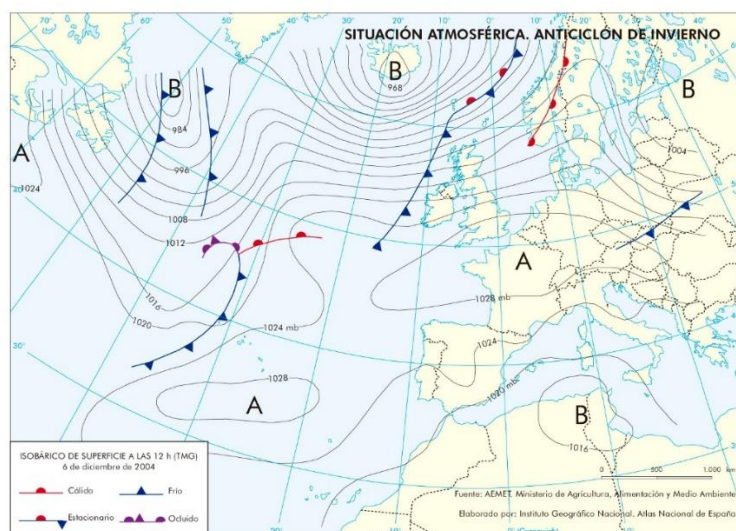
### B.1. Distribución del clima en España

A lo largo de este apéndice se presentan las situaciones climáticas más comunes a escala sinóptica a lo largo del territorio español. También se muestra la distribución/tendencia de diversos fenómenos meteorológicos asociados con las variables para cada caso de estudio (promedio y extremo). Por último, se hace hincapié en la clasificación climática de Köppen a nivel peninsular para el periodo 1981-2010.

#### B.1.1. Situación anticiclónica invernal

La situación atmosférica característica y predominante para la época invernal se caracteriza por la presencia de altas presiones gracias a la situación del Anticiclón continental europeo así como del Anticiclón de la Azores. Es la situación precisamente del primero, localizado en torno a los 50° de latitud, la que impide mayoritariamente la llegada de frentes y borrascas a la península. La presencia de estos anticiclones reporta un tiempo estable, soleado y seco en buena parte del territorio como consecuencia del estancamiento del aire frío.

Las noches invernales bajo el sistema de altas presiones se caracterizan en buena parte del territorio, sobretodo en la continentalidad de las mesetas, por las fuertes heladas. Las nieblas también son un hecho característico de esta estabilidad a lo largo del territorio. Aparecen frecuentemente en valles y depresiones del interior peninsular. La Figura B.1 muestra un ejemplo de la situación anticiclónica descrita para el periodo invernal:



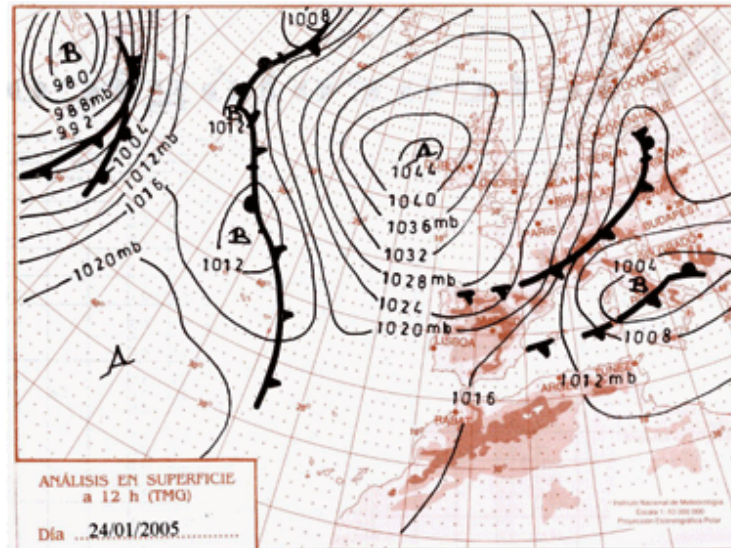
**Fig. B.1** Situación atmosférica de anticiclón de invierno. Fuente [22].

### B.1.2. Temporal de frío, nieve y viento

Aunque generalmente el invierno se caracteriza por la presencia de las altas presiones vista en el apartado anterior, también se dan situaciones de fuerte inestabilidad. En los meses más centrales del invierno, la situación de un anticiclón de eje norte-sur al oeste peninsular, sumada a la de un sistema de bajas presiones en la vertiente Mediterránea occidental, origina una corriente de vientos de origen polar-ártica que desarrolla frentes fríos y borrascas.

Cuando dichos frentes y borrascas llegan hasta la península, principalmente por el norte/noroeste peninsular, se origina un importante descenso térmico, inestabilidad atmosférica y fuertes precipitaciones a lo largo del tercio norte español.

Se originan fuertes nevadas sobre los principales sistemas montañosos del norte peninsular así como en la meseta septentrional. Además, los vientos se intensifican con el paso de los frentes en el norte/noreste peninsular. La Figura B.2 muestra una situación del temporal descrito:



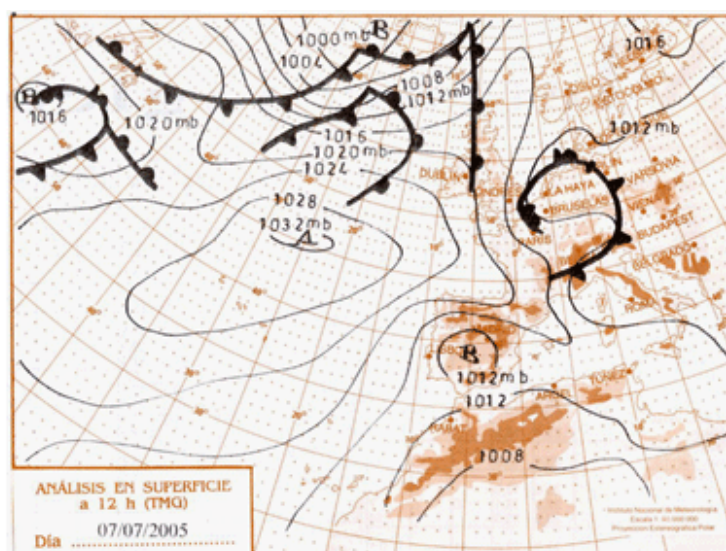
**Fig. B.2** Situación atmosférica del temporal de frío y nieve. Fuente [23].

### B.1.3. Situación de baja estival

Con la llegada del verano, el anticiclón de las Azores se sitúa entorno los 40-50 grados de latitud bloqueando la llegada de frentes y sistemas de bajas presiones procedentes de latitudes superiores. La situación del anticiclón, además, facilita la advección de masas de aire tropical.

A nivel general, el verano peninsular se caracteriza por la estabilidad presente a lo largo del desarrollo de la estación. Las temperaturas se incrementan situándose por encima de la media, los cielos son despejados y el ambiente caluroso, sobre todo en la mitad sur peninsular.

Aunque la estabilidad es predominante a lo largo de la época estival, pueden darse situaciones de inestabilidad generadas por movimientos convectivos a causa del calentamiento de la masa de aire más contigua a la superficie. La zona de mayor inestabilidad y donde se pueden generar núcleos tormentosos intensos, se corresponde con estaciones próximas a la costa o en los principales sistemas orográficos. Este hecho lo podemos ver ejemplificado en la Figura B.3, donde una baja presión se sitúa sobre la península mientras el anticiclón de las Azores impide la llegada de frentes fríos hasta ésta.



**Fig. B.3** Situación atmosférica de un sistema de bajas presiones estival. Fuente [23].

La baja presión se produce en un nivel atmosférico relativamente bajo. En altura, la península se encuentra bajo la influencia del anticiclón de las Azores, reportando estabilidad en dichos niveles.

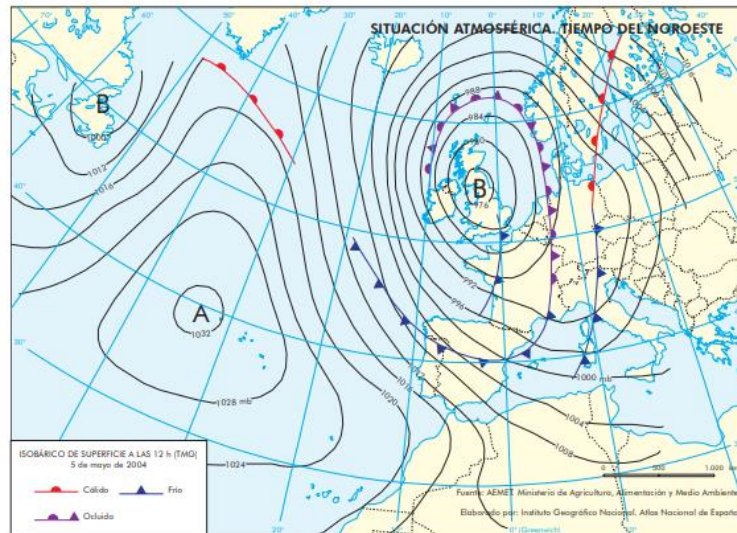
#### B.1.4. Tiempo del noroeste

Comúnmente, la mitad septentrional de la península sufre fenómenos meteorológicos a lo largo del año que dan lugar a inestabilidad, precipitaciones generalizadas y un descenso térmico de las temperaturas para cualquier época del año.

El tiempo del noreste se produce como consecuencia de una intensa borrasca originada en las proximidades del Reino Unido. Al sistema de bajas presiones, se le asocia un frente frío que afecta al territorio peninsular desplazándose de noroeste a sureste. Con el paso del frente se originan vientos de considerable magnitud e importantes precipitaciones que disminuyen a medida que avanza en la diagonal hacia el sureste.

Generalmente, este tiempo se asocia con la llegada de la época otoñal, debido al desplazamiento del anticiclón de las Azores, aunque ocasionalmente puede darse durante el periodo estival. Podemos ver la situación atmosférica descrita y la afectación del frente frío descrito en la península en la Figura B.4 a continuación:





**Fig. B.4** Situación atmosférica de frente de noroeste. Fuente [22].

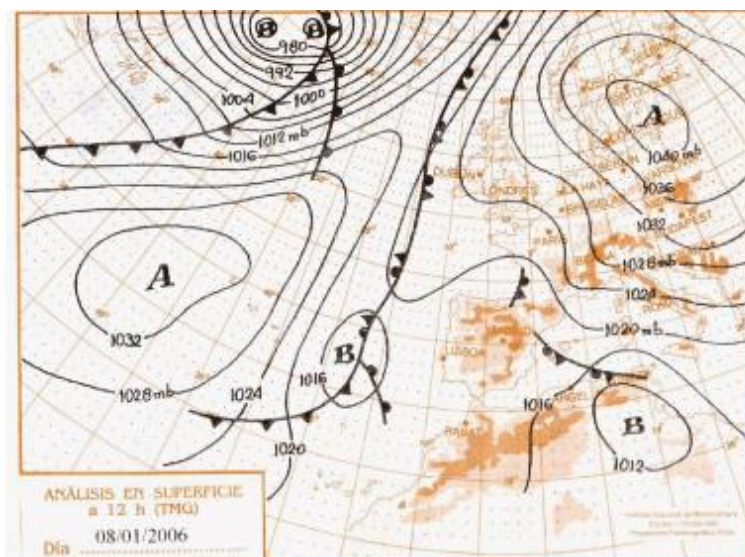
### B.1.5. Gota fría

La gota fría o DANA (depresión aislada en niveles altos) es una situación climática adversa que se produce con la llegada del otoño o de la primavera. Se experimenta particularmente en España y puede darse a lo largo de la costa mediterránea o contrariamente por el oeste peninsular.

La DANA se produce cuando un embolsamiento de aire frío y baja presión se separa de las grandes vaguadas y de la circulación general de la corriente de chorro polar. La separación se da generalmente como consecuencia de un bajo gradiente térmico horizontal, que provoca una fluidez más lenta del chorro, y la generación de meandros pronunciados que facilitan la separación de dicha bolsa de aire frío.

El embolsamiento desprendido del chorro polar se desplaza a lo largo del continente europeo, disminuyendo en latitud, llegando hasta masas de aire cálidas y húmedas. Al encontrarse con dichas masas se producen depresiones acompañadas de lluvias muy intensas, viento e inestabilidad. La Figura B.5 muestra la presencia de dos sistemas de bajas presiones relacionados con el concepto gota fría:





**Fig. B.5** Situación atmosférica con dos embolsamientos de aire frío en superficie. Fuente [23].

### B.1.6. Clima interanual

En definitiva, a gran escala sinóptica, el clima peninsular sigue una serie de directrices que se repiten de forma continua para cada periodo interanual. En términos generales, para la época invernal, existe una situación anticiclónica que garantiza una estabilidad generalizada en el territorio peninsular gracias al bloqueo de los frentes fríos polares por el anticiclón Continental Europeo. Dicha estabilidad se verá únicamente alterada, sobre todo en el tercio norte peninsular, con la llegada ocasional del temporal de frío, viento y nieve. Será durante los meses más centrales del invierno cuando la acción de los sistemas de bajas presiones del frente polar desplacen el anticiclón y se abran paso hasta la península.

Con la llegada de la primavera, la temperatura aumenta provocando la desaparición del anticiclón continental europeo. Este hecho, sumado a la baja influencia del anticiclón de las Azores, aumenta la probabilidad de desarrollo de bajas presiones sobre la península. Como consecuencia, pueden aparecer frentes y depresiones más activas afectando a regiones más allá del tercio norte peninsular. Las bajas presiones permiten la generación de tormentas convectivas en áreas de interior y de montaña para esta época del año.

Durante el periodo estival, el anticiclón de las Azores aumenta de latitud y se aproxima a la península y con él las masas de aire tropical. La estabilidad gobierna la península durante la mayor parte de esta época del año. Ocasionalmente, a lo largo del verano, la estabilidad se ve afectada por tormentas como consecuencia de bajas presiones de carácter local generadas por el calentamiento de la superficie. La vertiente cantábrica puede sufrir en esta época del año frentes relacionados con el tiempo del noreste.

En otoño el anticiclón de las Azores se desplaza hacia latitudes inferiores. Este hecho, sumado a la imposibilidad de la formación de un anticiclón continental europeo debido a la disminución insuficiente de la temperatura, facilita la entrada de bajas presiones por el norte peninsular (tiempo del noroeste). En esta época del año, a lo largo de la costa mediterránea también encontramos temporal inestable en relación a la DANA.

Describir las situaciones atmosféricas más comunes de nuestro territorio para cada periodo estacional nos permite relacionar los resultados obtenidos de *MI* con dichas situaciones. De esta manera, podemos obtener conclusiones fiables y dar explicación a las tendencias de *MI* en función de la situación meteorológica de cada estación.

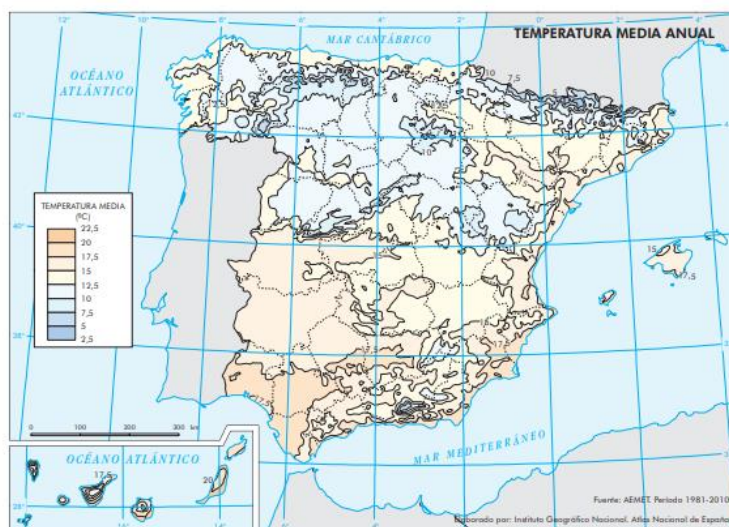
## **B.2. Distribución de fenómenos meteorológicos a lo largo del territorio español**

A continuación se presenta la distribución de diversos parámetros meteorológicos en el periodo 1981-2010. Su conocimiento, nos permitirá entender que variables pueden influir mayormente en *MI* en función de nuestra ubicación de análisis.

### **B.2.1. Temperatura media, máxima absoluta y mínima absoluta**

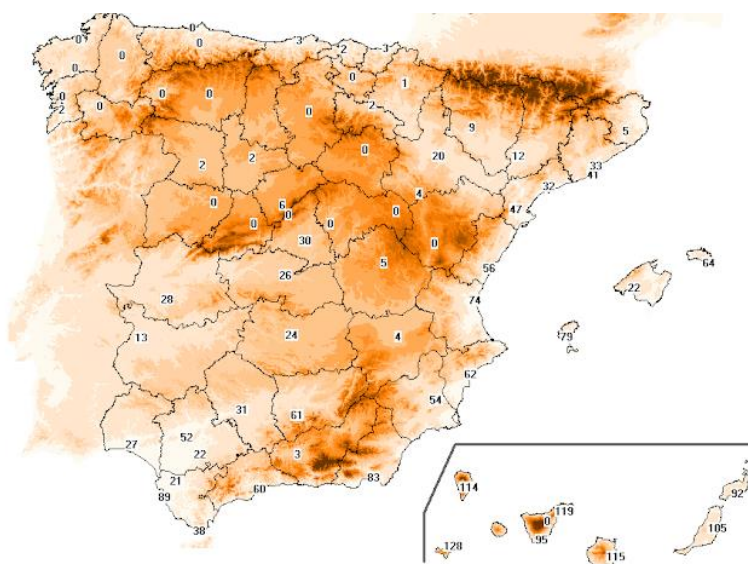
La distribución de la temperatura en España es muy irregular y diversa. Las zonas continentales, los principales sistemas montañosos y la inercia térmica del agua que rodea toda la península, provocan importantes amplitudes térmicas entre diferentes puntos del territorio.

En términos generales, las temperaturas medias del territorio oscilan entre los 0°C y los 22°C (desde los Pirineos hasta la parte más meridional de la península respectivamente). En su distribución, observamos una tendencia a la baja desde los litorales hacia el interior e inversamente de norte a sur. Podemos observar gráficamente la tendencia en la B.6:



**Fig. B.6** Distribución geográfica de la temperatura media en el periodo 1981-2010. [22].

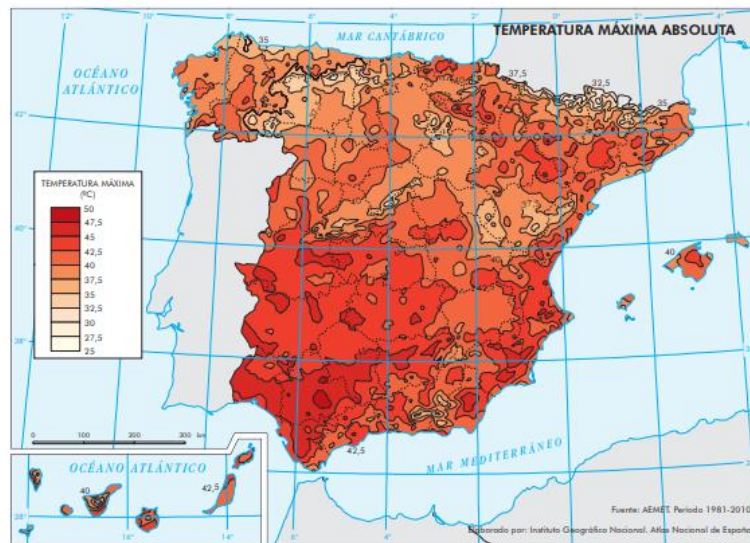
El conocimiento en la distribución de la temperatura media nos sirve como referencia para extrapolar la distribución de variables de temperatura como *TR*, *SU* e *ID*. Concretamente, para la variable extrema *TR*, la distribución se muestra a continuación en la Figura B.7 con la exposición de la magnitud a lo largo de las estaciones de la Figura 1.3.



**Fig. B.7** Distribución geográfica de la variable extrema *TR* en magnitud [24].

Debido al carácter extremo de las variables extremas *SU* e *ID*, se ha profundizado en la distribución térmica teniendo en cuenta la distribución de temperaturas máximas absolutas y mínimas absolutas (Figuras B.8 y B.9 respectivamente). De este modo, podemos conocer acerca del comportamiento

de las variables relacionadas con las altas y las bajas temperaturas respectivamente y podremos referenciarlas en la influencia sobre los índices *MI*.

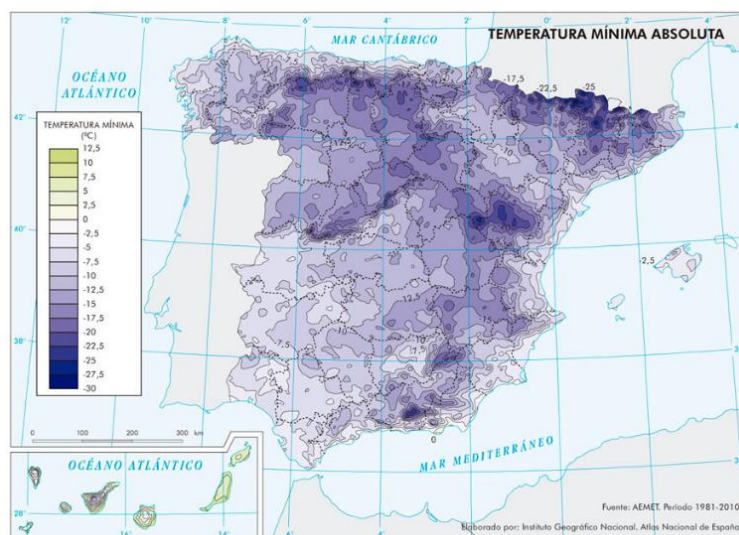


**Fig. B.8** Distribución geográfica de la temperatura máxima absoluta [22].

En relación a la distribución de la temperatura máxima absoluta mostrada en la Figura B.8, podemos ver como en general, el calor se intensifica para la mitad sur peninsular. De todos modos, está presente en mayor o menor medida sobre toda la península.

Por lo que hace a las temperaturas mínimas absolutas, la mitad septentrional de la península registra temperaturas más frías que la meridional así como las zonas del interior continental con respecto a las costas. En este caso, la distribución nos ayuda a relacionar de manera más aproximada la variable *ID*. El mapa de la distribución se puede observar a continuación en la Figura B.9:

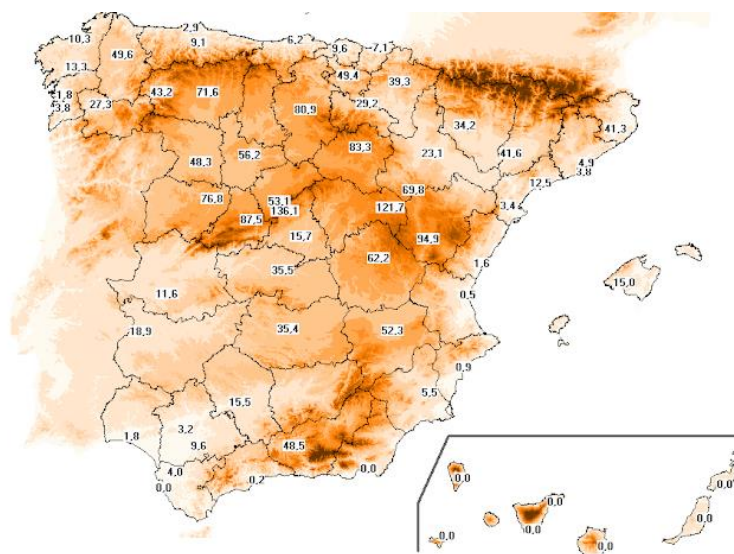




**Fig. B.9** Distribución geográfica de la temperatura mínima absoluta [22].

La distribución de las temperaturas mínimas absolutas nos aporta una posible tendencia de la variable extrema *ID* ya que no disponemos de una distribución geográfica de dicha variable para nuestro territorio.

Por otro lado, relacionado también con la temperatura mínima absoluta, aunque otros parámetros influyen en su conformación, tenemos las heladas. Este fenómeno meteorológico, influye en la conformación de *MI* en el caso de variables promedio mediante la variable *DH*. La Figura B.10 nos da información acerca de la magnitud para de la variable a lo largo de las diversas estaciones del territorio:



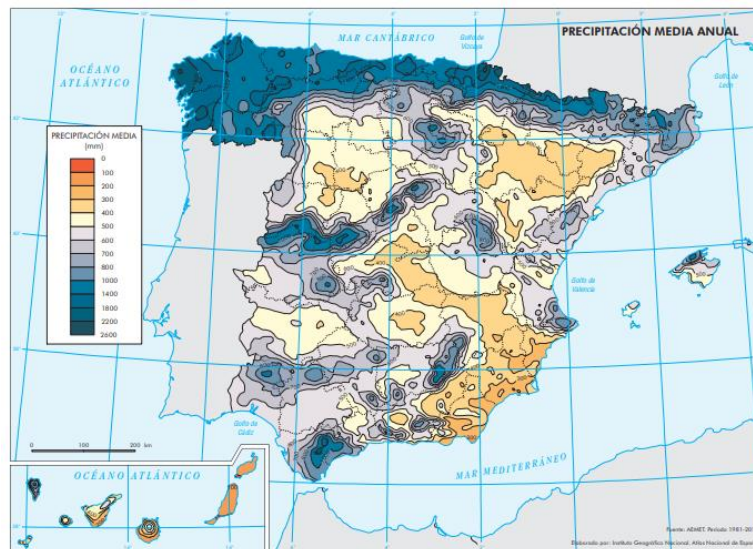
**Fig. B.10** Distribución geográfica de la variable extrema  $DH$  en magnitud [24].

### B.2.2. Precipitación

Podemos designar la precipitación como el elemento climático más importante en España. La orografía peninsular, la situación de las grandes cuencas y depresiones y el flujo de vientos húmedos predominantes desde el oeste, son los principales factores responsables de los fuertes contrastes pluviométricos a lo largo del territorio.

Dentro del territorio de estudio podemos establecer tres áreas diferenciadas (definidas en [25] por Capel Molina J. J en el 2001); la España lluviosa, la seca y la semidesértica. La divisoria entre la España lluviosa y la seca se suele establecer entre 600 y 800 mm de precipitación anual acumulada. La divisoria entre la España seca y la semidesértica se sitúa bajo el umbral de los 300 mm de precipitación anual acumulada. Aunque no se dispone de una representación espacial perfectamente asignada para la precipitación, las tres áreas expuestas anteriormente describen una buena distribución de la precipitación en la península.

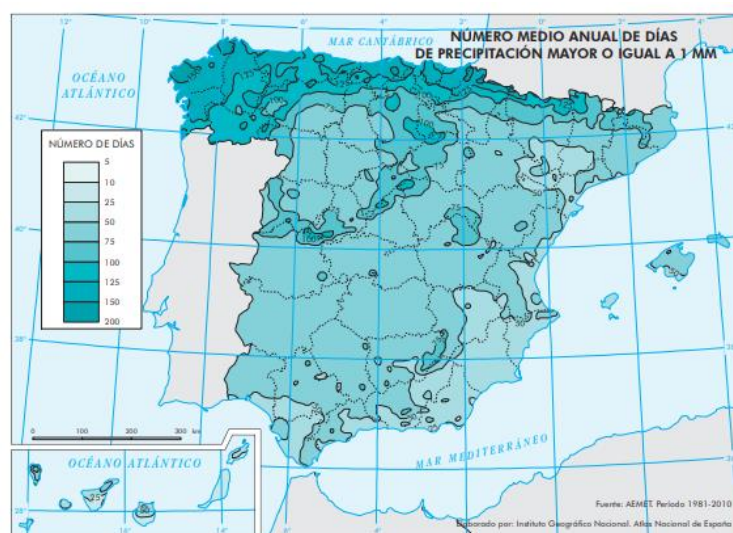
La España seca, la más extensa, ocupa buena parte del centro de la Península Ibérica. Dicha zona abarca las dos mesetas, la cuenca del Ebro, la depresión del Guadalquivir y gran parte de la fachada oriental ibérica. Claras excepciones a las regiones anteriores se corresponden con el sur peninsular y los litorales sur Mediterráneo y sur Atlántico. La España semidesértica se da principalmente en el suroeste peninsular y en buena parte de la provincia de Almería, Murcia, Granada y Alicante. Gráficamente podemos ver en la Figura B.11 la distribución de la precipitación media para el periodo 1981-2010:



**Fig. B.11** Distribución geográfica de la precipitación media acumulada [22].

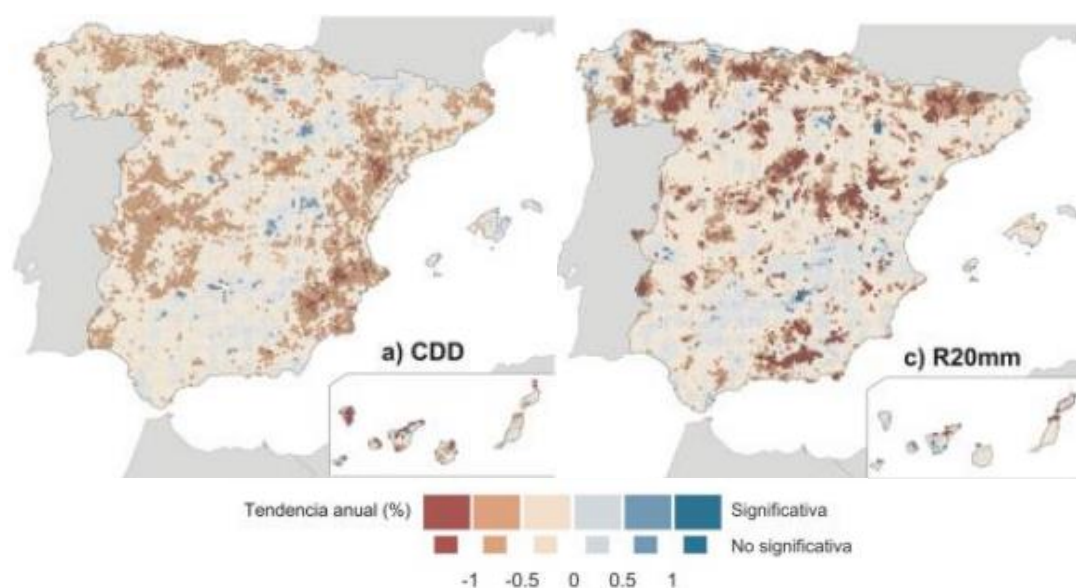
Generalmente, la distribución en la precipitación disminuye de norte a sur y de oeste a este, por lo que en la diagonal imaginaria que une Galicia y Almería se produce un contraste pluviométrico extremo.

Para el estudio de meteodiversidad, la distribución en la precipitación es de vital importancia debido a las variables, tanto de variables promedio (*DR*) como extremas (*R20mm* y *CDD*), que se rigen por la tendencia de dicha distribución. Por un lado, la distribución de *DR* para el caso de variables promedio sigue directamente la tendencia mostrada en la Figura B.12:



**Fig. B.12** Distribución geográfica de la variable promedio *DR* [22].

Para las variables extremas *CDD* y *R20mm* podemos observar una tendencia a lo largo de la segunda mitad del siglo XX (ver Figura B.13) que nos puede ser útil para evaluar y entender la influencia de estas variables sobre el cálculo de *MI*.



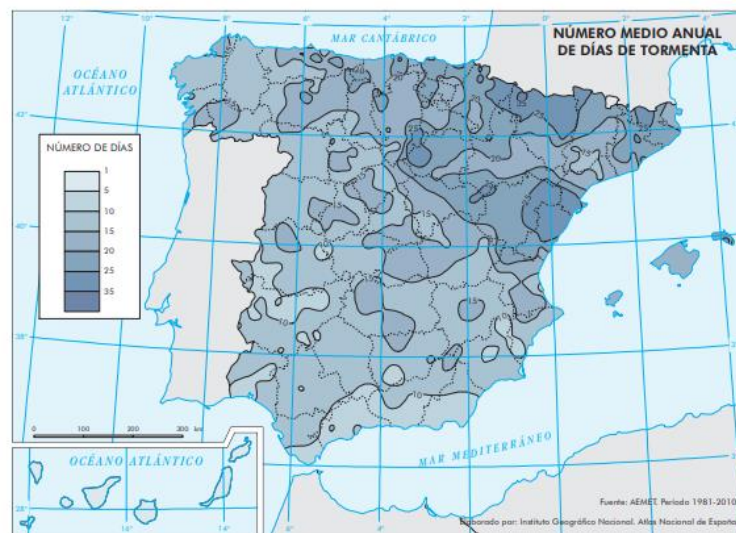
**Fig. B.13** Tendencia de las variables extremas *CDD* y *R20mm* en la segunda mitad del siglo XX. Fuente [26].



### B.2.3. Hidrometeoros. Tormentas

Las tormentas afectan directamente al *MI* en el caso de variables promedio a través de *DT*. En su totalidad, también influyen indirectamente sobre el *MI* a través variables relacionadas con la precipitación, el viento y la variación de temperaturas.

Las tormentas pueden ocurrir en cualquier época del año en función de la diferente naturaleza que pueden tener. Generalmente, la mayor frecuencia de estas se da durante los meses de mayo a septiembre según las diversas situaciones meteorológicas a gran escala. La variable promedio *DT*, expuesta en la Figura B.14, muestra sus mayores valores a lo largo del tercio norte peninsular (Pirineos, el Sistema Ibérico y buena parte del valle del Ebro).



**Fig. B.14** Distribución geográfica de la variable promedio *DT* [22].

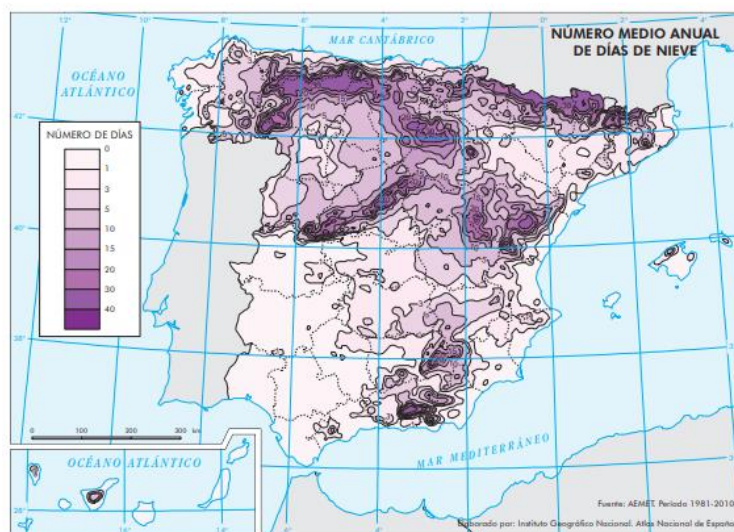
Los sistemas montañosos son puntos de generación de procesos convectivos por lo que la distribución en las tormentas se intensifica para para estas áreas. En nuestro estudio, como se expone en el capítulo 1, no contemplamos ubicaciones de carácter montañoso por no ser potencialmente ubicaciones de interés aeronáutico y por no disponer de una base de datos completa de valores de *DT* para estas áreas. Aún y así la cercanía de ciertas estaciones contempladas en el estudio con respecto a los grandes sistemas orográficos peninsulares, tendrá afectación directa de los fenómenos que se den o se originen en dichos sistemas montañosos (brisas de montaña, efecto Föhn, fenómenos convectivos, etc...).



### B.2.4. Hidrometeoros. Nieve

La nieve es un fenómeno poco habitual para la mayor parte de España con excepción de los principales sistemas montañosos (que registran más de 30 días de nieve al año por encima de los 1500 metros). La altitud favorece al fenómeno que frecuentemente va relacionado con la distribución en la precipitación en forma de lluvia.

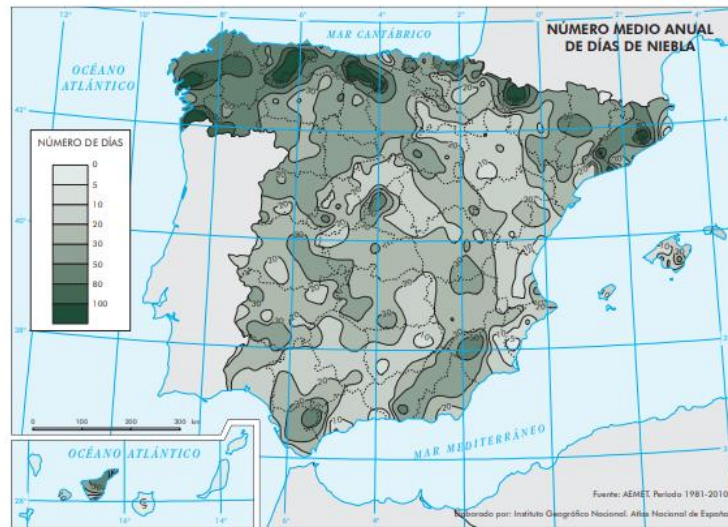
La nieve es más frecuente para la mitad norte peninsular debido a la mayor exposición a la llegada de frentes fríos así como al temporal de frío y nieve para los meses centrales del invierno. En las costas (litoral mediterráneo y atlántico así como todo el sureste peninsular) la nieve es prácticamente inexistente. La tendencia y distribución del fenómeno se presenta en la Figura B.15 mediante la distribución de la variable *DN*:



**Fig. B.15** Distribución geográfica de la variable promedio *DN* [22].

### B.2.5. Niebla

La niebla, que representa un factor crítico a nivel aeronáutico, presenta una distribución muy irregular. A lo largo del territorio la magnitud de esta variable varía desde los 10 días de media anuales (e. g. para localizaciones del sureste peninsular) hasta los más de 100 en estaciones del norte peninsular. Como muestra la Figura B.16, la niebla es importante en el tercio norte, sobre todo en los puntos elevados de la Cordillera Cantábrica así como en la mitad septentrional continental.



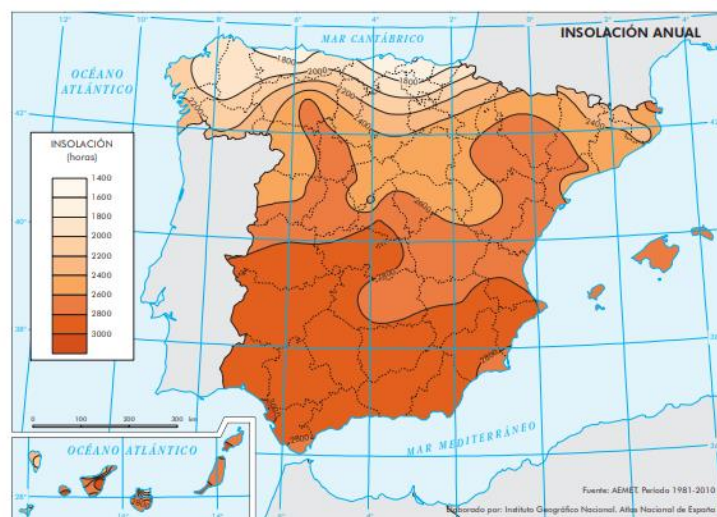
**Fig. B.16** Distribución geográfica de la variable promedio  $DF$  [22].

Generalmente la niebla se produce debido al enfriamiento radiativo, la advección de aire cálido o debido a una mezcla turbulenta. La niebla se da cuando, bajo una situación anticiclónica con advecciones cálidas gobernada por la estabilidad y los cielos despejados, se produce un enfriamiento radiativo (e. g. Una brisa catabática, una advección cálida y/o el aporte de humedad desde el río o lago).

### B.2.6. Insolación y días despejados

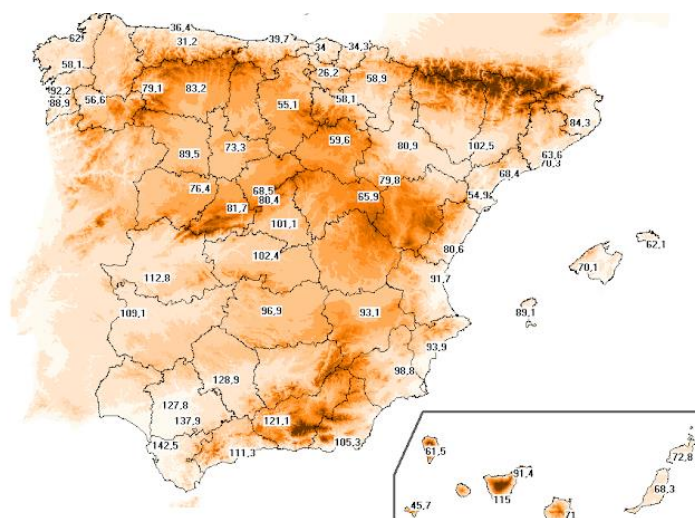
La distribución de la Insolación para el territorio peninsular va directamente asociada a la variable promedio  $I$ . En la distribución de la variable a lo largo del territorio el mapa podemos diferenciar tres grandes regiones en función de la magnitud que cobra la variable anualmente.

Debido a la frecuente nubosidad, fruto de los tiempos que llegan desde el Atlántico, la Cornisa Cantábrica se corresponde con la región peninsular con menor insolación anual, entre 1800 y 2000 horas de sol anuales. Una segunda área, con valores anuales entorno 2000 y 2600 horas, se extiende prácticamente desde el sur de Galicia hasta Cataluña. La mitad meridional de la Península en términos generales representa la tercera región diferenciada con más de 2600 horas al año. En la Figura B.17 podemos observar la distribución de la variable promedio  $I$  a lo largo del territorio español:



**Fig. B.17** Distribución geográfica de la variable promedio  $I$  [22].

Relacionada con la insolación y la radiación diarias en cada una de las estaciones del territorio, la Figura B.18 presenta la magnitud del promedio total de número de días despejados (variable promedio  $DD$ ) en cada estación de la Figura 1.2. La distribución sigue una tendencia similar a la de insolación vista.



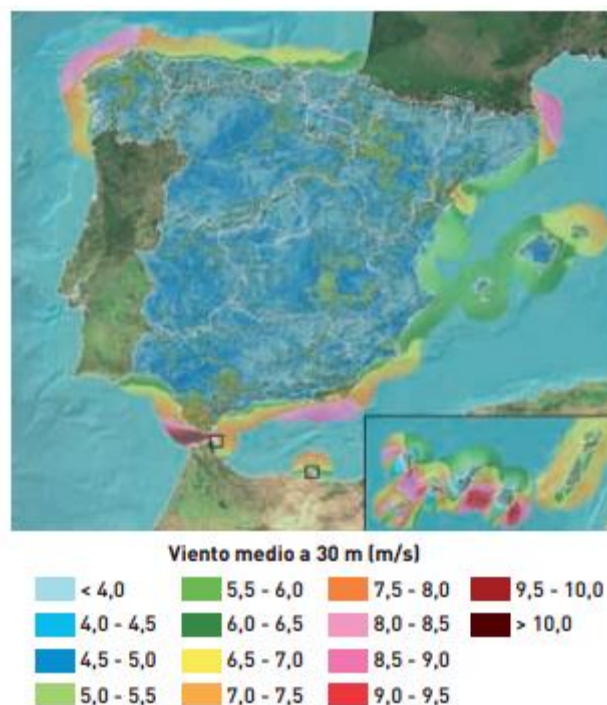
**Fig. B.18** Distribución geográfica de la variable promedio  $DD$  en magnitud [24].

### B.2.7. Viento

El viento es un fenómeno crítico para el sector aeronáutico. Las intenciones sobre la distribución de su tendencia se deben a la variable extrema *FG6Bft* considerada.

La compleja orografía y la insularidad del resto del territorio favorecen la existencia de vientos locales y regionales, así como la aparición de rotores, cizalladura y turbulencia en la cercanía de las zonas montañosas. Esta serie de vientos, representan elementos significativos a nivel climático en algunas áreas. No existe una pauta general para el recorrido o magnitud del viento en su distribución temporal anualmente. Generalmente aumenta a medida que nos acercamos a los sistemas montañosos de la península, donde también se da la mayor probabilidad de la existencia de rotores y turbulencia, o en puntos marcados a lo largo de toda la costa española debido a las brisas marinas (ver [27]).

A nivel general, la racha máxima se produce entre los meses de octubre a marzo. Combinando recorridos elevados de viento y rachas máximas, las áreas más ventosas de España se ajustan con la proximidad al estrecho de Gibraltar (Tarifa), algunos puntos en la costa gallega, el norte del litoral catalán, la costa guipuzcoana al completo, el norte de Navarra y algunas zonas concretas del valle del Ebro. La Figura B.19 nos muestra la tendencia de los valores de viento en medida a 30 metros de la superficie.



**Fig. B.19** Tendencia en la magnitud del viento peninsular para un periodo de 30 años a una altura de 30 m. [27].

### B.3. Clasificación climática de Köppen para la península entre 1981 y 2010

La clasificación de Köppen (ver en [22]) se basa en la distribución de una serie de umbrales de temperatura y precipitación. De acuerdo con la clasificación la mayor parte de España se designa con un clima templado tipo C. El clima templado, se subdivide en los siguientes casos; la zona norte debido al clima lluvioso que presenta durante la mayor parte del año se designa como *Cf*. En buena parte del resto peninsular, el verano es seco por lo que se designa como *Cs*. En ambos casos, para los climas templados *Cf* y *CS*, se añade a o b en función de si la temperatura para el mes más cálido sobrepasa el umbral de los 22°C.

El norte español presenta un clima templado lluvioso con temperaturas que provocan veranos frescos característicos de una clasificación *Cfb*. Si nos desplazamos hacia el interior peninsular desde la zona norte, el clima registra ciertos cambios que lo llevan hacia desde veranos secos y suaves, *Csb* hasta veranos secos calurosos a medida que disminuimos en latitud y nos acercamos a las principales costas. En relación a los principales sistemas orográficos de la península, debido a la presencia de la nieve en los meses más fríos del año, se producen tendencias climáticas de tipo *D* relacionados con climas fríos y sin estación seca.

Por otro lado, en zonas de la mitad sur más oriental y en algún punto de Aragón (Desierto de los Monegros) se da la existencia de zonas secas que Köppen relaciona con la letra *B*. La degradación del *Csa* hacia un clima más seco origina climas esteparios *BS* que pueden ser calurosos (*BSh*) o fríos (*BSk*). Estos climas son típicos de zonas del interior de la meseta sur y del valle del Ebro. En el extremo de los climas esteparios, se desarrollan condiciones desérticas (tipos *BWh* y *BWk*) típicas en ciertos puntos del sureste español. En la Figura B.20 se exponen gráficamente los climas comentados en cada región del territorio para el periodo comprendido entre 1981 y 2010:





**Fig. B.20** Clasificación climática de Köppen en España para el periodo 1981-2010. [22].

## APÉNDICE C

A continuación se muestran tablas de soporte en los análisis llevados a cabo a lo largo del capítulo 4 para los aeropuertos de A Coruña, Adolfo Suárez Madrid-Barajas, Bilbao y Josep Tarradellas Barcelona-El Prat. Dichas tablas presentan el valor absoluto de las variables usadas en cada aeropuerto para referirse a los fenómenos que las guías climáticas de AEMET [12] describen.

### A Coruña. LECO

**Tabla C.1** Valor de las variables *DF* y *FG6Bft* para todo el periodo analizado y estacional para LECO.

LECO	anual	invierno	primavera	verano	otoño
<i>DF</i>	37.0	3.6	5.7	17.6	10.0
<i>FG6Bft</i>	1.7	1.1	0.3	-	0.2

### Adolfo Suárez Madrid-Barajas. LEMD

**Tabla C.2** Valor de las variables *DF*, *DT* y *FG6Bft* para todo el periodo analizado y estacional para LEMD.

LEMD	anual	invierno	primavera	verano	otoño
<i>DF</i>	16.8	11.7	1.2	0.1	3.7
<i>DT</i>	14.0	0.3	4.5	6.4	2.8
<i>FG6Bft</i>	0.8	0.5	0.4	-	-

### Bilbao. LEBB

**Tabla C.3** Valor de la variable *FG6Bft* para todo el periodo analizado y estacional para LEBB.

LEBB	anual	invierno	primavera	verano	otoño
<i>FG6Bft</i>	1.1	0.8	0.1	-	0.2

## Josep Tarradellas Barcelona-El Prat. LEBL

**Tabla C.4** Valor de las variables *DT*, *DF*, *R20mm* y *FG6Bft* todo el periodo analizado y estacional para LEBL.

<b>LEBL</b>	<b>anual</b>	<b>invierno</b>	<b>primavera</b>	<b>verano</b>	<b>otoño</b>
<b><i>DT</i></b>	19.9	1.1	3.8	6.3	7.5
<b><i>DF</i></b>	9.4	1.8	4.3	1.1	2.3
<b><i>R20mm</i></b>	8.0	1.5	1.4	1.8	3.6
<b><i>FG6Bft</i></b>	0.9	0.3	0.3	0.3	0.3



## APÉNDICE D

En este apéndice se detalla y expone la totalidad del código usado para llevar a cabo la conformación de los índices *MI* a partir de los datos extraídos desde AEMET [4] para variables promedio y ECA&D [5] para variables extremas.

### D.1. *MI* promedio de todo el periodo

```
%MI PROMEDIO DE TODO EL PERIODO.
%.CSV EXTRAÍDOS DIRECTAMENTE DESDE LA BASE DE DATOS DE LA AEMET EN [2].

file = readtable("burgos_aeropuerto.csv");
%Creo un array de las líneas leídas del .csv.
Anual = table2array(file(13,1));
%Convierto array de cell a str y proceso.
Anual_string = string(Anual);
Anual_string = erase(Anual_string, '');
string_vector = strsplit(Anual_string, ',');

%Para MI promedio solo me interesan los campos desde Anual_string(7) a
Anual_string(13) correspondidos con DR DN DT DF DH DD I.

%Se establece un control para los campos "-" marcados por la AEMET
%Computaran como valor 0 para no tener efecto sobre MI.

DR = string_vector(7);
if (DR ~= "-")
    DR = str2num(string_vector(7));
else
    DR = 0;
end

DN = string_vector(8);
if (DN ~= "-")
    DN = str2num(string_vector(8));
else
    DN = 0;
end

DT = string_vector(9);
if (DT ~= "-")
    DT = str2num(string_vector(9));
else
    DT = 0;
end

DF = string_vector(10);
if (DF ~= "-")
    DF = str2num(string_vector(10));
else
    DR = 0;
end
```

```
DH = string_vector(11);
if (DH ~= "-")
    DH = str2num(string_vector(11));
else
    DH = 0;
end

DD = string_vector(12);
if (DD ~= "-")
    DD = str2num(string_vector(12));
else
    DD = 0;
end

I = string_vector(13);
if (I ~= "-")
    I = str2num(string_vector(13));
else
    I = 0;
end

%Se establece en este punto un control en caso de disponer variables negativas ya
que todos los valores deben de ser positivos para conformar MI (estas líneas no se
han procesado para nuestros datos).

if (DR < 0)
    DR = DR * (-1);
end

if (DN < 0)
    DN = DN * (-1);
end

if (DT < 0)
    DT = DT * (-1);
end

if (DF < 0)
    DF = DF * (-1);
end

if (DH < 0)
    DH = DH * (-1);
end

if (DD < 0)
    DD = DD * (-1);
end

if (I < 0)
    I = I * (-1);
end

%Suma global del total de variables.
Suma = DR + DN + DT + DF + DH + DD + I;

%Influencia de cada variable en MI.
cociente_DR = 0;
```

```

if (DR > 0)
    cociente_DR = (DR/Suma) * log2(DR/Suma);
end

cociente_DN = 0;
if (DN > 0)
    cociente_DN = (DN/Suma) * log2(DN/Suma);
end

cociente_DT = 0;
if (DT > 0)
    cociente_DT = (DT/Suma) * log2(DT/Suma);
end

cociente_DF = 0;
if (DF > 0)
    cociente_DF = (DF/Suma) * log2(DF/Suma);
end

cociente_DH = 0;
if (DH > 0)
    cociente_DH = (DH/Suma) * log2(DH/Suma);
end

cociente_DD = 0;
if (DD > 0)
    cociente_DD = (DD/Suma) * log2(DD/Suma);
end

cociente_I = 0;
if (I > 0)
    cociente_I = (I/Suma) * log2(I/Suma);
end

%Cálculo de MI como suma de todos los cocientes designados.
MI = -(cociente_DR + cociente_DN + cociente_DT + cociente_DF + cociente_DH +
cociente_DD + cociente_I);

```

*[Published with MATLAB® R2020a](#)*

## D.2. *MI* promedio para cada estación

```

%MI PROMEDIO PARA CADA ESTACIÓN.
%.CSV EXTRAÍDOS DIRECTAMENTE DESDE LA BASE DE DATOS DE LA AEMET EN [2].

file = readtable("EXAMPLE.csv");

%Separo por meses del año.
enero = erase(string(table2array(file(1,1))), '');
febrero = erase(string(table2array(file(2,1))), '');
marzo = erase(string(table2array(file(3,1))), '');
abril = erase(string(table2array(file(4,1))), '');
mayo = erase(string(table2array(file(5,1))), '');

```

```

junio = erase(string(table2array(file(6,1))), '');
julio = erase(string(table2array(file(7,1))), '');
agosto = erase(string(table2array(file(8,1))), '');
septiembre = erase(string(table2array(file(9,1))), '');
octubre = erase(string(table2array(file(10,1))), '');
noviembre = erase(string(table2array(file(11,1))), '');
diciembre = erase(string(table2array(file(12,1))), '');

%Para MI solo me interesan desde string_"mes"(7) hasta string_"mes"(13).
string_enero = strsplit(enero, ',');
string_febrero = strsplit(febrero, ',');
string_marzo = strsplit(marzo, ',');
string_abril = strsplit(abril, ',');
string_mayo = strsplit(mayo, ',');
string_junio = strsplit(junio, ',');
string_julio = strsplit(julio, ',');
string_agosto = strsplit(agosto, ',');
string_septiembre = strsplit(septiembre, ',');
string_octubre = strsplit(octubre, ',');
string_noviembre = strsplit(noviembre, ',');
string_diciembre = strsplit(diciembre, ',');

%A continuación extraigo los datos de cada variable, proceso en caso de obtener "-"
o disponer de un valor negativo y agrupo por estaciones MET (DEF, MAM, JJA, SOC).

%DR estacional.
DR_enero = string_enero(7);
if (DR_enero ~= "-")
    DR_enero = str2num(string_enero(7));
    if (DR_enero < 0)
        DR_enero = DR_enero * (-1);
    end
else
    DR_enero = 0;
end

DR_febrero = string_febrero(7);
if (DR_febrero ~= "-")
    DR_febrero = str2num(string_febrero(7));
    if (DR_febrero < 0)
        DR_febrero = DR_febrero * (-1);
    end
else
    DR_febrero = 0;
end

DR_marzo = string_marzo(7);
if (DR_marzo ~= "-")
    DR_marzo = str2num(string_marzo(7));
    if (DR_marzo < 0)
        DR_marzo = DR_marzo * (-1);
    end
else
    DR_marzo = 0;
end

DR_abril = string_abril(7);
if (DR_abril ~= "-")

```

```
DR_abril = str2num(string_abril(7));
if (DR_abril < 0)
    DR_abril = DR_abril * (-1);
end
else
    DR_abril = 0;
end

DR_mayo = string_mayo(7);
if (DR_mayo ~= "-")
    DR_mayo = str2num(string_mayo(7));
    if (DR_mayo < 0)
        DR_mayo = DR_mayo * (-1);
    end
else
    DR_mayo = 0;
end

DR_junio = string_junio(7);
if (DR_junio ~= "-")
    DR_junio = str2num(string_junio(7));
    if (DR_junio < 0)
        DR_junio = DR_junio * (-1);
    end
else
    DR_junio = 0;
end

DR_julio = string_julio(7);
if (DR_julio ~= "-")
    DR_julio = str2num(string_julio(7));
    if (DR_julio < 0)
        DR_julio = DR_julio * (-1);
    end
else
    DR_julio = 0;
end

DR_agosto = string_agosto(7);
if (DR_agosto ~= "-")
    DR_agosto = str2num(string_agosto(7));
    if (DR_agosto < 0)
        DR_agosto = DR_agosto * (-1);
    end
else
    DR_agosto = 0;
end

DR_septiembre = string_septiembre(7);
if (DR_septiembre ~= "-")
    DR_septiembre = str2num(string_septiembre(7));
    if (DR_septiembre < 0)
        DR_septiembre = DR_septiembre * (-1);
    end
else
    DR_septiembre = 0;
end
```

```

DR_octubre = string_octubre(7);
if (DR_octubre ~= "-")
    DR_octubre = str2num(string_octubre(7));
    if (DR_octubre < 0)
        DR_octubre = DR_octubre * (-1);
    end
else
    DR_octubre = 0;
end

DR_noviembre = string_noviembre(7);
if (DR_noviembre ~= "-")
    DR_noviembre = str2num(string_noviembre(7));
    if (DR_noviembre < 0)
        DR_noviembre = DR_noviembre * (-1);
    end
else
    DR_noviembre = 0;
end

DR_diciembre = string_diciembre(7);
if (DR_diciembre ~= "-")
    DR_diciembre = str2num(string_diciembre(7));
    if (DR_diciembre < 0)
        DR_diciembre = DR_diciembre * (-1);
    end
else
    DR_diciembre = 0;
end

DR_invierno = DR_diciembre + DR_enero + DR_febrero;
DR_primavera = DR_marzo + DR_abril + DR_mayo;
DR_verano = DR_junio + DR_julio + DR_agosto;
DR_otono = DR_septiembre + DR_octubre + DR_noviembre;

%DN estacional.
DN_enero = string_enero(8);
if (DN_enero ~= "-")
    DN_enero = str2num(string_enero(8));
    if (DN_enero < 0)
        DN_enero = DN_enero * (-1);
    end
else
    DN_enero = 0;
end

DN_febrero = string_febrero(8);
if (DN_febrero ~= "-")
    DN_febrero = str2num(string_febrero(8));
    if (DN_febrero < 0)
        DN_febrero = DN_febrero * (-1);
    end
else
    DN_febrero = 0;
end

DN_marzo = string_marzo(8);
if (DN_marzo ~= "-")

```

```
DN_marzo = str2num(string_marzo(8));
if (DN_marzo < 0)
    DN_marzo = DN_marzo * (-1);
end
else
    DN_marzo = 0;
end

DN_abril = string_abril(8);
if (DN_abril ~= "-")
    DN_abril = str2num(string_abril(8));
    if (DN_abril < 0)
        DN_abril = DN_abril * (-1);
    end
else
    DN_abril = 0;
end

DN_mayo = string_mayo(8);
if (DN_mayo ~= "-")
    DN_mayo = str2num(string_mayo(8));
    if (DN_mayo < 0)
        DN_mayo = DN_mayo * (-1);
    end
else
    DN_mayo = 0;
end

DN_junio = string_junio(8);
if (DN_junio ~= "-")
    DN_junio = str2num(string_junio(8));
    if (DN_junio < 0)
        DN_junio = DN_junio * (-1);
    end
else
    DN_junio = 0;
end

DN_julio = string_julio(8);
if (DN_julio ~= "-")
    DN_julio = str2num(string_julio(8));
    if (DN_julio < 0)
        DN_julio = DN_julio * (-1);
    end
else
    DN_julio = 0;
end

DN_agosto = string_agosto(8);
if (DN_agosto ~= "-")
    DN_agosto = str2num(string_agosto(8));
    if (DN_agosto < 0)
        DN_agosto = DN_agosto * (-1);
    end
else
    DN_agosto = 0;
end
```

```

DN_septiembre = string_septiembre(8);
if (DN_septiembre ~= "-")
    DN_septiembre = str2num(string_septiembre(8));
    if (DN_septiembre < 0)
        DN_septiembre = DN_septiembre * (-1);
    end
else
    DN_septiembre = 0;
end

DN_octubre = string_octubre(8);
if (DN_octubre ~= "-")
    DN_octubre = str2num(string_octubre(8));
    if (DN_octubre < 0)
        DN_octubre = DN_octubre * (-1);
    end
else
    DN_octubre = 0;
end

DN_noviembre = string_noviembre(8);
if (DN_noviembre ~= "-")
    DN_noviembre = str2num(string_noviembre(8));
    if (DN_noviembre < 0)
        DN_noviembre = DN_noviembre * (-1);
    end
else
    DN_noviembre = 0;
end

DN_diciembre = string_diciembre(8);
if (DN_diciembre ~= "-")
    DN_diciembre = str2num(string_diciembre(8));
    if (DN_diciembre < 0)
        DN_diciembre = DN_diciembre * (-1);
    end
else
    DN_diciembre = 0;
end

DN_invierno = DN_diciembre + DN_enero + DN_febrero;
DN_primavera = DN_marzo + DN_abril + DN_mayo;
DN_verano = DN_junio + DN_julio + DN_agosto;
DN_otono = DN_septiembre + DN_octubre + DN_noviembre;

%DT estacional.
DT_enero = string_enero(9);
if (DT_enero ~= "-")
    DT_enero = str2num(string_enero(9));
    if (DT_enero < 0)
        DT_enero = DT_enero * (-1);
    end
else
    DT_enero = 0;
end

DT_febrero = string_febrero(9);
if (DT_febrero ~= "-")

```



```
DT_febrero = str2num(string_febrero(9));
if (DT_febrero < 0)
    DT_febrero = DT_febrero * (-1);
end
else
    DT_febrero = 0;
end

DT_marzo = string_marzo(9);
if (DT_marzo ~= "-")
    DT_marzo = str2num(string_marzo(9));
    if (DT_marzo < 0)
        DT_marzo = DT_marzo * (-1);
    end
else
    DT_marzo = 0;
end

DT_abril = string_abril(9);
if (DT_abril ~= "-")
    DT_abril = str2num(string_abril(9));
    if (DT_abril < 0)
        DT_abril = DT_abril * (-1);
    end
else
    DT_abril = 0;
end

DT_mayo = string_mayo(9);
if (DT_mayo ~= "-")
    DT_mayo = str2num(string_mayo(9));
    if (DT_mayo < 0)
        DT_mayo = DT_mayo * (-1);
    end
else
    DT_mayo = 0;
end

DT_junio = string_junio(9);
if (DT_junio ~= "-")
    DT_junio = str2num(string_junio(9));
    if (DT_junio < 0)
        DT_junio = DT_junio * (-1);
    end
else
    DT_junio = 0;
end

DT_julio = string_julio(9);
if (DT_julio ~= "-")
    DT_julio = str2num(string_julio(9));
    if (DT_julio < 0)
        DT_julio = DT_julio * (-1);
    end
else
    DT_julio = 0;
end
```

```

DT_agosto = string_agosto(9);
if (DT_agosto ~= "-")
    DT_agosto = str2num(string_agosto(9));
    if (DT_agosto < 0)
        DT_agosto = DT_agosto * (-1);
    end
else
    DT_agosto = 0;
end

DT_septiembre = string_septiembre(9);
if (DT_septiembre ~= "-")
    DT_septiembre = str2num(string_septiembre(9));
    if (DT_septiembre < 0)
        DT_septiembre = DT_septiembre * (-1);
    end
else
    DT_septiembre = 0;
end

DT_octubre = string_octubre(9);
if (DT_octubre ~= "-")
    DT_octubre = str2num(string_octubre(9));
    if (DT_octubre < 0)
        DT_octubre = DT_octubre * (-1);
    end
else
    DT_octubre = 0;
end

DT_noviembre = string_noviembre(9);
if (DT_noviembre ~= "-")
    DT_noviembre = str2num(string_noviembre(9));
    if (DT_noviembre < 0)
        DT_noviembre = DT_noviembre * (-1);
    end
else
    DT_noviembre = 0;
end

DT_diciembre = string_diciembre(9);
if (DT_diciembre ~= "-")
    DT_diciembre = str2num(string_diciembre(9));
    if (DT_diciembre < 0)
        DT_diciembre = DT_diciembre * (-1);
    end
else
    DT_diciembre = 0;
end

DT_invierno = DT_diciembre + DT_enero + DT_febrero;
DT_primavera = DT_marzo + DT_abril + DT_mayo;
DT_verano = DT_junio + DT_julio + DT_agosto;
DT_otono = DT_septiembre + DT_octubre + DT_noviembre;

%DF estacional.
DF_enero = string_enero(10);
if (DF_enero ~= "-")

```

```
    DF_enero = str2num(string_enero(10));
    if (DF_enero < 0)
        DF_enero = DF_enero * (-1);
    end
else
    DF_enero = 0;
end

DF_febrero = string_febrero(10);
if (DF_febrero ~= "-")
    DF_febrero = str2num(string_febrero(10));
    if (DF_febrero < 0)
        DF_febrero = DF_febrero * (-1);
    end
else
    DF_febrero = 0;
end

DF_marzo = string_marzo(10);
if (DF_marzo ~= "-")
    DF_marzo = str2num(string_marzo(10));
    if (DF_marzo < 0)
        DF_marzo = DF_marzo * (-1);
    end
else
    DF_marzo = 0;
end

DF_abril = string_abril(10);
if (DF_abril ~= "-")
    DF_abril = str2num(string_abril(10));
    if (DF_abril < 0)
        DF_abril = DF_abril * (-1);
    end
else
    DF_abril = 0;
end

DF_mayo = string_mayo(10);
if (DF_mayo ~= "-")
    DF_mayo = str2num(string_mayo(10));
    if (DF_mayo < 0)
        DF_mayo = DF_mayo * (-1);
    end
else
    DF_mayo = 0;
end

DF_junio = string_junio(10);
if (DF_junio ~= "-")
    DF_junio = str2num(string_junio(10));
    if (DF_junio < 0)
        DF_junio = DF_junio * (-1);
    end
else
    DF_junio = 0;
end
```

```
DF_julio = string_julio(10);
if (DF_julio ~= "-")
    DF_julio = str2num(string_julio(10));
    if (DF_julio < 0)
        DF_julio = DF_julio * (-1);
    end
else
    DF_julio = 0;
end

DF_agosto = string_agosto(10);
if (DF_agosto ~= "-")
    DF_agosto = str2num(string_agosto(10));
    if (DF_agosto < 0)
        DF_agosto = DF_agosto * (-1);
    end
else
    DF_agosto = 0;
end

DF_septiembre = string_septiembre(10);
if (DF_septiembre ~= "-")
    DF_septiembre = str2num(string_septiembre(10));
    if (DF_septiembre < 0)
        DF_septiembre = DF_septiembre * (-1);
    end
else
    DF_septiembre = 0;
end

DF_octubre = string_octubre(10);
if (DF_octubre ~= "-")
    DF_octubre = str2num(string_octubre(10));
    if (DF_octubre < 0)
        DF_octubre = DF_octubre * (-1);
    end
else
    DF_octubre = 0;
end

DF_noviembre = string_noviembre(10);
if (DF_noviembre ~= "-")
    DF_noviembre = str2num(string_noviembre(10));
    if (DF_noviembre < 0)
        DF_noviembre = DF_noviembre * (-1);
    end
else
    DF_noviembre = 0;
end

DF_diciembre = string_diciembre(10);
if (DF_diciembre ~= "-")
    DF_diciembre = str2num(string_diciembre(10));
    if (DF_diciembre < 0)
        DF_diciembre = DF_diciembre * (-1);
    end
else
    DF_diciembre = 0;
end
```

```
end

DF_invierno = DF_diciembre + DF_enero + DF_febrero;
DF_primavera = DF_marzo + DF_abril + DF_mayo;
DF_verano = DF_junio + DF_julio + DF_agosto;
DF_otono = DF_septiembre + DF_octubre + DF_noviembre;

%DH estacional.
DH_enero = string_enero(11);
if (DH_enero ~= "-")
    DH_enero = str2num(string_enero(11));
    if (DH_enero < 0)
        DH_enero = DH_enero * (-1);
    end
else
    DH_enero = 0;
end

DH_febrero = string_febrero(11);
if (DH_febrero ~= "-")
    DH_febrero = str2num(string_febrero(11));
    if (DH_febrero < 0)
        DH_febrero = DH_febrero * (-1);
    end
else
    DH_febrero = 0;
end

DH_marzo = string_marzo(11);
if (DH_marzo ~= "-")
    DH_marzo = str2num(string_marzo(11));
    if (DH_marzo < 0)
        DH_marzo = DH_marzo * (-1);
    end
else
    DH_marzo = 0;
end

DH_abril = string_abril(11);
if (DH_abril ~= "-")
    DH_abril = str2num(string_abril(11));
    if (DH_abril < 0)
        DH_abril = DH_abril * (-1);
    end
else
    DH_abril = 0;
end

DH_mayo = string_mayo(11);
if (DH_mayo ~= "-")
    DH_mayo = str2num(string_mayo(11));
    if (DH_mayo < 0)
        DH_mayo = DH_mayo * (-1);
    end
else
    DH_mayo = 0;
end
```

```
DH_junio = string_junio(11);
if (DH_junio ~= "-")
    DH_junio = str2num(string_junio(11));
    if (DH_junio < 0)
        DH_junio = DH_junio * (-1);
    end
else
    DH_junio = 0;
end

DH_julio = string_julio(11);
if (DH_julio ~= "-")
    DH_julio = str2num(string_julio(11));
    if (DH_julio < 0)
        DH_julio = DH_julio * (-1);
    end
else
    DH_julio = 0;
end

DH_agosto = string_agosto(11);
if (DH_agosto ~= "-")
    DH_agosto = str2num(string_agosto(11));
    if (DH_agosto < 0)
        DH_agosto = DH_agosto * (-1);
    end
else
    DH_agosto = 0;
end

DH_septiembre = string_septiembre(11);
if (DH_septiembre ~= "-")
    DH_septiembre = str2num(string_septiembre(11));
    if (DH_septiembre < 0)
        DH_septiembre = DH_septiembre * (-1);
    end
else
    DH_septiembre = 0;
end

DH_octubre = string_octubre(11);
if (DH_octubre ~= "-")
    DH_octubre = str2num(string_octubre(11));
    if (DH_octubre < 0)
        DH_octubre = DH_octubre * (-1);
    end
else
    DH_octubre = 0;
end

DH_noviembre = string_noviembre(11);
if (DH_noviembre ~= "-")
    DH_noviembre = str2num(string_noviembre(11));
    if (DH_noviembre < 0)
        DH_noviembre = DH_noviembre * (-1);
    end
else
    DH_noviembre = 0;
end
```

```
end

DH_diciembre = string_diciembre(11);
if (DH_diciembre ~= "-")
    DH_diciembre= str2num(string_diciembre(11));
    if (DH_diciembre< 0)
        DH_diciembre = DH_diciembre* (-1);
    end
else
    DH_diciembre = 0;
end

DH_invierno = DH_diciembre + DH_enero + DH_febrero;
DH_primavera = DH_marzo + DH_abril + DH_mayo;
DH_verano = DH_junio + DH_julio + DH_agosto;
DH_otono = DH_septiembre + DH_octubre + DH_noviembre;

%DD estacional.
DD_enero = string_enero(12);
if (DD_enero ~= "-")
    DD_enero = str2num(string_enero(12));
    if (DD_enero < 0)
        DD_enero = DD_enero * (-1);
    end
else
    DD_enero = 0;
end

DD_febrero = string_febrero(12);
if (DD_febrero ~= "-")
    DD_febrero = str2num(string_febrero(12));
    if (DD_febrero < 0)
        DD_febrero = DD_febrero * (-1);
    end
else
    DD_febrero = 0;
end

DD_marzo = string_marzo(12);
if (DD_marzo ~= "-")
    DD_marzo = str2num(string_marzo(12));
    if (DD_marzo< 0)
        DD_marzo = DD_marzo * (-1);
    end
else
    DD_marzo = 0;
end

DD_abril = string_abril(12);
if (DD_abril ~= "-")
    DD_abril = str2num(string_abril(12));
    if (DD_abril < 0)
        DD_abril = DD_abril * (-1);
    end
else
    DD_abril = 0;
end
```

```
DD_mayo = string_mayo(12);
if (DD_mayo ~= "-")
    DD_mayo = str2num(string_mayo(12));
    if (DD_mayo < 0)
        DD_mayo = DD_mayo * (-1);
    end
else
    DD_mayo = 0;
end

DD_junio = string_junio(12);
if (DD_junio ~= "-")
    DD_junio = str2num(string_junio(12));
    if (DD_junio < 0)
        DD_junio = DD_junio * (-1);
    end
else
    DD_junio = 0;
end

DD_julio = string_julio(12);
if (DD_julio ~= "-")
    DD_julio = str2num(string_julio(12));
    if (DD_julio < 0)
        DD_julio = DD_julio * (-1);
    end
else
    DD_julio = 0;
end

DD_agosto = string_agosto(12);
if (DD_agosto ~= "-")
    DD_agosto = str2num(string_agosto(12));
    if (DD_agosto < 0)
        DD_agosto = DD_agosto * (-1);
    end
else
    DD_agosto = 0;
end

DD_septiembre = string_septiembre(12);
if (DD_septiembre ~= "-")
    DD_septiembre = str2num(string_septiembre(12));
    if (DD_septiembre < 0)
        DD_septiembre = DD_septiembre * (-1);
    end
else
    DD_septiembre = 0;
end

DD_octubre = string_octubre(12);
if (DD_octubre ~= "-")
    DD_octubre = str2num(string_octubre(12));
    if (DD_octubre < 0)
        DD_octubre = DD_octubre * (-1);
    end
else
    DD_octubre = 0;
end
```



```
end

DD_noviembre = string_noviembre(12);
if (DD_noviembre ~= "-")
    DD_noviembre = str2num(string_noviembre(12));
    if (DD_noviembre < 0)
        DD_noviembre = DD_noviembre * (-1);
    end
else
    DD_noviembre = 0;
end

DD_diciembre = string_diciembre(12);
if (DD_diciembre ~= "-")
    DD_diciembre = str2num(string_diciembre(12));
    if (DD_diciembre < 0)
        DD_diciembre = DD_diciembre * (-1);
    end
else
    DD_diciembre = 0;
end

DD_invierno = DD_diciembre + DD_enero + DD_febrero;
DD_primavera = DD_marzo + DD_abril + DD_mayo;
DD_verano = DD_junio + DD_julio + DD_agosto;
DD_otono = DD_septiembre + DD_octubre + DD_noviembre;

%I estacional.
I_enero = string_enero(13);
if (I_enero ~= "-")
    I_enero = str2num(string_enero(13));
    if (I_enero < 0)
        I_enero = I_enero * (-1);
    end
else
    I_enero = 0;
end

I_febrero = string_febrero(13);
if (I_febrero ~= "-")
    I_febrero = str2num(string_febrero(13));
    if (I_febrero < 0)
        I_febrero = I_febrero * (-1);
    end
else
    I_febrero = 0;
end

I_marzo = string_marzo(13);
if (I_marzo ~= "-")
    I_marzo = str2num(string_marzo(13));
    if (I_marzo < 0)
        I_marzo = I_marzo * (-1);
    end
else
    I_marzo = 0;
end
```

```
I_abril = string_abril(13);
if (I_abril ~= "-")
    I_abril = str2num(string_abril(13));
    if (I_abril < 0)
        I_abril = I_abril * (-1);
    end
else
    I_abril = 0;
end

I_mayo = string_mayo(13);
if (I_mayo ~= "-")
    I_mayo = str2num(string_mayo(13));
    if (I_mayo < 0)
        I_mayo = I_mayo * (-1);
    end
else
    I_mayo = 0;
end

I_junio = string_junio(13);
if (I_junio ~= "-")
    I_junio = str2num(string_junio(13));
    if (I_junio < 0)
        I_junio = I_junio * (-1);
    end
else
    I_junio = 0;
end

I_julio = string_julio(13);
if (I_julio ~= "-")
    I_julio = str2num(string_julio(13));
    if (I_julio < 0)
        I_julio = I_julio * (-1);
    end
else
    I_julio = 0;
end

I_agosto = string_agosto(13);
if (I_agosto ~= "-")
    I_agosto = str2num(string_agosto(13));
    if (I_agosto < 0)
        I_agosto = I_agosto * (-1);
    end
else
    I_agosto = 0;
end

I_septiembre = string_septiembre(13);
if (I_septiembre ~= "-")
    I_septiembre = str2num(string_septiembre(13));
    if (I_septiembre < 0)
        I_septiembre = I_septiembre * (-1);
    end
else
    I_septiembre = 0;
end
```

```

end

I_octubre = string_octubre(13);
if (I_octubre ~= "-")
    I_octubre = str2num(string_octubre(13));
    if (I_octubre < 0)
        I_octubre = I_octubre * (-1);
    end
else
    I_octubre = 0;
end

I_noviembre = string_noviembre(13);
if (I_noviembre ~= "-")
    I_noviembre = str2num(string_noviembre(13));
    if (I_noviembre < 0)
        I_noviembre = I_noviembre * (-1);
    end
else
    I_noviembre = 0;
end

I_diciembre = string_diciembre(13);
if (I_diciembre ~= "-")
    I_diciembre = str2num(string_diciembre(13));
    if (I_diciembre < 0)
        I_diciembre = I_diciembre * (-1);
    end
else
    I_diciembre = 0;
end

I_invierno = I_diciembre + I_enero + I_febrero;
I_primavera = I_marzo + I_abril + I_mayo;
I_verano = I_junio + I_julio + I_agosto;
I_otono = I_septiembre + I_octubre + I_noviembre;

%Grupo los resultados de cada una de las variables por estaciones y extraigo MI.

%Invierno.
Suma_invierno = DR_invierno + DN_invierno + DT_invierno + DF_invierno + DH_invierno
+ DD_invierno + I_invierno;

%Influencia de cada variable en MI.
cociente_DR_invierno = 0;
if (DR_invierno > 0)
    cociente_DR_invierno = (DR_invierno/Suma_invierno) *
log2(DR_invierno/Suma_invierno);
end

cociente_DN_invierno = 0;
if (DN_invierno > 0)
    cociente_DN_invierno = (DN_invierno/Suma_invierno) *
log2(DN_invierno/Suma_invierno);
end

cociente_DT_invierno = 0;
if (DT_invierno > 0)

```

```

        cociente_DT_invierno = (DT_invierno/Suma_invierno) *
log2(DT_invierno/Suma_invierno);
end

cociente_DF_invierno = 0;
if (DF_invierno > 0)
    cociente_DF_invierno = (DF_invierno/Suma_invierno) *
log2(DF_invierno/Suma_invierno);
end

cociente_DH_invierno = 0;
if (DH_invierno > 0)
    cociente_DH_invierno = (DH_invierno/Suma_invierno) *
log2(DH_invierno/Suma_invierno);
end

cociente_DD_invierno = 0;
if (DD_invierno > 0)
    cociente_DD_invierno = (DD_invierno/Suma_invierno) *
log2(DD_invierno/Suma_invierno);
end

cociente_I_invierno = 0;
if (I_invierno > 0)
    cociente_I_invierno = (I_invierno/Suma_invierno) *
log2(I_invierno/Suma_invierno);
end

%Cálculo de MI invernal.
MI_invierno = -(cociente_DR_invierno + cociente_DN_invierno + cociente_DT_invierno
+ cociente_DF_invierno + cociente_DH_invierno + cociente_DD_invierno +
cociente_I_invierno);

%Primavera.
Suma_primavera = DR_primavera + DN_primavera + DT_primavera + DF_primavera+
DH_primavera + DD_primavera+ I_primavera;

%Influencia de cada variable en MI.
cociente_DR_primavera = 0;
if (DR_primavera > 0)
    cociente_DR_primavera = (DR_primavera/Suma_primavera) *
log2(DR_primavera/Suma_primavera);
end

cociente_DN_primavera = 0;
if (DN_primavera > 0)
    cociente_DN_primavera = (DN_primavera/Suma_primavera) *
log2(DN_primavera/Suma_primavera);
end

cociente_DT_primavera = 0;
if (DT_primavera > 0)
    cociente_DT_primavera = (DT_primavera/Suma_primavera) *
log2(DT_primavera/Suma_primavera);
end

cociente_DF_primavera = 0;
if (DF_primavera > 0)

```

```

        cociente_DF_primavera = (DF_primavera/Suma_primavera) *
log2(DF_primavera/Suma_primavera);
end

cociente_DH_primavera = 0;
if (DH_primavera > 0)
    cociente_DH_primavera= (DH_primavera/Suma_primavera) *
log2(DH_primavera/Suma_primavera);
end

cociente_DD_primavera = 0;
if (DD_primavera > 0)
    cociente_DD_primavera = (DD_primavera/Suma_primavera) *
log2(DD_primavera/Suma_primavera);
end

cociente_I_primavera = 0;
if (I_primavera > 0)
    cociente_I_primavera = (I_primavera/Suma_primavera) *
log2(I_primavera/Suma_primavera);
end

%Cálculo de MI primavera.
MI_primavera = -(cociente_DR_primavera + cociente_DN_primavera +
cociente_DT_primavera + cociente_DF_primavera + cociente_DH_primavera +
cociente_DD_primavera + cociente_I_primavera);

%Verano.
Suma_verano = DR_verano + DN_verano + DT_verano + DF_verano + DH_verano + DD_verano
+ I_verano;

%Influencia de cada variable en MI.
cociente_DR_verano = 0;
if (DR_verano > 0)
    cociente_DR_verano = (DR_verano/Suma_verano) * log2(DR_verano/Suma_verano);
end

cociente_DN_verano = 0;
if (DN_verano > 0)
    cociente_DN_verano = (DN_verano/Suma_verano) * log2(DN_verano/Suma_verano);
end

cociente_DT_verano = 0;
if (DT_verano > 0)
    cociente_DT_verano = (DT_verano/Suma_verano) * log2(DT_verano/Suma_verano);
end

cociente_DF_verano = 0;
if (DF_verano > 0)
    cociente_DF_verano = (DF_verano/Suma_verano) * log2(DF_verano/Suma_verano);
end

cociente_DH_verano = 0;
if (DH_verano > 0)
    cociente_DH_verano = (DH_verano/Suma_verano) * log2(DH_verano/Suma_verano);
end

cociente_DD_verano = 0;

```

```

if (DD_verano > 0)
    cociente_DD_verano = (DD_verano/Suma_verano) * log2(DD_verano/Suma_verano);
end

cociente_I_verano = 0;
if (I_verano > 0)
    cociente_I_verano = (I_verano/Suma_verano) * log2(I_verano/Suma_verano);
end

%Cálculo de MI estival.
MI_verano = -(cociente_DR_verano + cociente_DN_verano + cociente_DT_verano +
cociente_DF_verano + cociente_DH_verano + cociente_DD_verano + cociente_I_verano);

%Otono.
Suma_otono = DR_otono + DN_otono + DT_otono + DF_otono + DH_otono + DD_otono +
I_otono;

%Influencia de cada variable en MI.
cociente_DR_otono = 0;
if (DR_otono > 0)
    cociente_DR_otono = (DR_otono/Suma_otono) * log2(DR_otono/Suma_otono);
end

cociente_DN_otono = 0;
if (DN_otono > 0)
    cociente_DN_otono = (DN_otono/Suma_otono) * log2(DN_otono/Suma_otono);
end

cociente_DT_otono = 0;
if (DT_otono > 0)
    cociente_DT_otono = (DT_otono/Suma_otono) * log2(DT_otono/Suma_otono);
end

cociente_DF_otono = 0;
if (DF_otono > 0)
    cociente_DF_otono = (DF_otono/Suma_otono) * log2(DF_otono/Suma_otono);
end

cociente_DH_otono = 0;
if (DH_otono > 0)
    cociente_DH_otono = (DH_otono/Suma_otono) * log2(DH_otono/Suma_otono);
end

cociente_DD_otono = 0;
if (DD_otono > 0)
    cociente_DD_otono = (DD_otono/Suma_otono) * log2(DD_otono/Suma_otono);
end

cociente_I_otono = 0;
if (I_otono > 0)
    cociente_I_otono = (I_otono/Suma_otono) * log2(I_otono/Suma_otono);
end

%Cálculo de MI otoñal.
MI_otono = -(cociente_DR_otono + cociente_DN_otono + cociente_DT_otono +
cociente_DF_otono + cociente_DH_otono + cociente_DD_otono + cociente_I_otono);

```

*Published with MATLAB® R2020a*

### D.3. Procesado de .csv para variables extremas

```
%PROCESADO DE LOS .CSV VARIABLES EXTREMAS

%Para trabajar con la información procedente de la base de datos de la ECA&D en
[3](archivos .txt de cada variable), se ha seguido el siguiente prodecimiento:

%1.0 Se han guardado en un excel en formato .csv las columnas numéricas de cada
fichero .txt. Se ha copiado y pegado en el .csv únicamente los valores numéricos de
todas las filas y columnas del .txt desde 1981 hasta 2010 correspondidas con:

%      01-06 SQUID: Source identifier
%      08-11 YEAR : YYYY
%      13-20 ANNUAL DATA VALUES
%      21-28 WINTER HALF YEAR DATA VALUES
%      29-36 SUMMER HALF YEAR DATA VALUES
%      37-44 WINTER (DJF) DATA VALUES
%      45-52 SPRING (MAM) DATA VALUES
%      53-60 SUMMER (JJA) DATA VALUES
%      61-68 AUTUMN (SON) DATA VALUES
%      69-76 JANUARY DATA VALUES
%      etc.
%      157-164 DECEMBER DATA VALUES

%2.0 Una vez dispongo del .csv con los datos anteriores, procedemos a calcular
los promedios para todo el periodo y para cada estación (e. g a continuación para
la variable CDD en la estación de albacete:

      file = readtable("CDD_Albacete.csv");

%      De las columnas anteriores únicamente cojemos únicamente las
%      necesarias:
%      13-20 ANNUAL DATA VALUES - columna 3 del csv.
%      37-44 WINTER (DJF) DATA VALUES - columna 6 del csv.
%      45-52 SPRING (MAM) DATA VALUES - columna 7 del csv.
%      53-60 SUMMER (JJA) DATA VALUES - columna 8 del csv.
%      61-68 AUTUMN (SON) DATA VALUES - columna 9 del csv.

      Periodo = table2array(file(:,3));
      Invierno = table2array(file(:,6));
      Primavera = table2array(file(:,7));
      Verano = table2array(file(:,8));
      Otono = table2array(file(:,9));

      longitud = length(Periodo);

%3.0 Calculo las medias para todo el periodo y estacionalmente.
%
%      Media de todo el periodo.

%      *-999999 lo detona la ECA&D cuando no dispone de variable. Es
%      equivalente a 0*.
```

```
    ia = 1;
    suma_periodo = 0;

    while (ia <= longitud)
        if (Periodo(ia) == -999999)
            Periodo(ia) = 0;
        end
        suma_periodo = suma_periodo + Periodo(ia);
        ia = ia+1;
    end

    MEDIA_PERIODO = suma_periodo/longitud;

% Media por estaciones.
% Invierno.
    ii = 1;
    suma_invierno = 0;

    while (ii <= longitud)
        if (Invierno(ii) == -999999)
            Invierno(ii) = 0;
        end
        suma_invierno = suma_invierno + Invierno(ii);
        ii = ii+1;
    end

    MEDIA_INVIERNO = suma_invierno/longitud;

% Primavera.
    ip = 1;
    suma_primavera = 0;

    while (ip <= longitud)
        if (Primavera(ip) == -999999)
            Primavera(ip) = 0;
        end
        suma_primavera = suma_primavera + Primavera(ip);
        ip = ip+1;
    end

    MEDIA_PRIMAVERA = suma_primavera/longitud;

% Verano.
    iv = 1;
    suma_verano = 0;

    while (iv <= longitud)
        if (Verano(iv) == -999999)
            Verano(iv) = 0;
        end
        suma_verano = suma_verano + Verano(iv);
        iv = iv+1;
    end

    MEDIA_VERANO = suma_verano/longitud;

% Otoño.
```



```

io = 1;
suma_otono = 0;

while (io <= longitud)
    if (Otono(io) == -999999)
        Otono(io) = 0;
    end
    suma_otono = suma_otono + Otono(io);
    io = io+1;
end

MEDIA_OTONO = suma_otono/longitud;

% Por último, anotamos las medias obtenidas para cada variable en otro .csv
% como se muestra a continuación en la Figura D.1. Se ha usado el código anterior
% para todas las variables (CDD R20mm SU TR FG6Bft ID) individualmente para cada
% estación.

```

*Published with MATLAB® R2020a*

Albaceteextremo						
Epoca	CDD	FG6	ID	R20	SU	TR
Text	Number	Number	Number	Number	Number	Number
Epoca	CDD	FG6	ID	R20	SU	TR
Anual	6170	3.33	16.67	263.33	1326.3	933.33
Invierno	2423.3	3.33	6.67	40	0	0
Primavera	2326.7	6.667	0	53.33	1733.3	3.33
Verano	5133.3	0	0	63.33	8593.3	906.667
Otono	2570	0	0	106.67	2936.7	23.3

**Fig. D.1** Ejemplo de tabla en formato .csv generada con las medias de todas las variables extremas calculadas para todo el periodo y por estaciones.

#### D.4. *MI* extremo para todo el periodo y por estaciones

```

%MI EXTREMO PARA TODO EL PERIODO Y POR ESTACIONES.

%Con el .csv obtenido para cada estación con las medias de todo el periodo y por
%estaciones como se muestra el la Figura D.1, calculamos los MI:

file = readtable("ejemplo.csv");
CDD = (table2array(file(:,2)));
FG6 = (table2array(file(:,3)));
ID = (table2array(file(:,4)));
R20 = (table2array(file(:,5)));
SU = (table2array(file(:,6)));
TR = (table2array(file(:,7)));

%Promedio.
suma_promedio = CDD(1)+FG6(1)+ID(1)+R20(1)+SU(1)+TR(1);

```

```

%Coeficientes del promedio.
cociente_CDD = 0;
if (CDD(1) > 0)
    cociente_CDD = (CDD(1)/suma_promedio) * log2(CDD(1)/suma_promedio);
end

cociente_FG6 = 0;
if (FG6(1) > 0)
    cociente_FG6 = (FG6(1)/suma_promedio) * log2(FG6(1)/suma_promedio);
end

cociente_ID = 0;
if (ID(1) > 0)
    cociente_ID = (ID(1)/suma_promedio) * log2(ID(1)/suma_promedio);
end

cociente_R20 = 0;
if (R20(1) > 0)
    cociente_R20 = (R20(1)/suma_promedio) * log2(R20(1)/suma_promedio);
end

cociente_SU = 0;
if (SU(1) > 0)
    cociente_SU = (SU(1)/suma_promedio) * log2(SU(1)/suma_promedio);
end

cociente_TR = 0;
if (TR(1) > 0)
    cociente_TR = (TR(1)/suma_promedio) * log2(TR(1)/suma_promedio);
end

%MI Global.
MI_GLOBAL = -(cociente_CDD + cociente_FG6 + cociente_ID + cociente_R20 +
cociente_SU + cociente_TR);

%MI por estaciones.

%Invierno.
suma_invierno = CDD(2)+FG6(2)+ID(2)+R20(2)+SU(2)+TR(2);

%Influencia en MI en invierno.
cociente_CDD_invierno = 0;
if (CDD(2) > 0)
    cociente_CDD_invierno = (CDD(2)/suma_invierno) * log2(CDD(2)/suma_invierno);
end

cociente_FG6_invierno = 0;
if (FG6(2) > 0)
    cociente_FG6_invierno = (FG6(2)/suma_invierno) * log2(FG6(2)/suma_invierno);
end

cociente_ID_invierno = 0;
if (ID(2) > 0)
    cociente_ID_invierno = (ID(2)/suma_invierno) * log2(ID(2)/suma_invierno);
end

cociente_R20_invierno = 0;

```

```

if (R20(2) > 0)
    cociente_R20_invierno = (R20(2)/suma_invierno) * log2(R20(2)/suma_invierno);
end

cociente_SU_invierno = 0;
if (SU(2) > 0)
    cociente_SU_invierno = (SU(2)/suma_invierno) * log2(SU(2)/suma_invierno);
end

cociente_TR_invierno = 0;
if (TR(2) > 0)
    cociente_TR_invierno = (TR(2)/suma_invierno) * log2(TR(2)/suma_invierno);
end

MI_INVIERNO = -(cociente_CDD_invierno + cociente_FG6_invierno +
cociente_ID_invierno + cociente_R20_invierno + cociente_SU_invierno +
cociente_TR_invierno);

%Primavera.
suma_primavera = CDD(3)+FG6(3)+ID(3)+R20(3)+SU(3)+TR(3);

%Influencia en MI en primavera.
cociente_CDD_primavera = 0;
if (CDD(3) > 0)
    cociente_CDD_primavera = (CDD(3)/suma_primavera) * log2(CDD(3)/suma_primavera);
end

cociente_FG6_primavera = 0;
if (FG6(3) > 0)
    cociente_FG6_primavera = (FG6(3)/suma_primavera) * log2(FG6(3)/suma_primavera);
end

cociente_ID_primavera = 0;
if (ID(3) > 0)
    cociente_ID_primavera = (ID(3)/suma_primavera) * log2(ID(3)/suma_primavera);
end

cociente_R20_primavera = 0;
if (R20(3) > 0)
    cociente_R20_primavera = (R20(3)/suma_primavera) * log2(R20(3)/suma_primavera);
end

cociente_SU_primavera = 0;
if (SU(3) > 0)
    cociente_SU_primavera = (SU(3)/suma_primavera) * log2(SU(3)/suma_primavera);
end

cociente_TR_primavera = 0;
if (TR(3) > 0)
    cociente_TR_primavera = (TR(3)/suma_primavera) * log2(TR(3)/suma_primavera);
end

MI_PRIMAVERA = -(cociente_CDD_primavera + cociente_FG6_primavera +
cociente_ID_primavera + cociente_R20_primavera + cociente_SU_primavera +
cociente_TR_primavera);

%Verano.

```

```

suma_verano = CDD(4)+FG6(4)+ID(4)+R20(4)+SU(4)+TR(4);

%Influencia en MI en verano.
cociente_CDD_verano = 0;
if (CDD(4) > 0)
    cociente_CDD_verano = (CDD(4)/suma_verano) * log2(CDD(4)/suma_verano);
end

cociente_FG6_verano = 0;
if (FG6(4) > 0)
    cociente_FG6_verano = (FG6(4)/suma_verano) * log2(FG6(4)/suma_verano);
end

cociente_ID_verano = 0;
if (ID(4) > 0)
    cociente_ID_verano = (ID(4)/suma_verano) * log2(ID(4)/suma_verano);
end

cociente_R20_verano = 0;
if (R20(4) > 0)
    cociente_R20_verano = (R20(4)/suma_verano) * log2(R20(4)/suma_verano);
end

cociente_SU_verano = 0;
if (SU(4) > 0)
    cociente_SU_verano = (SU(4)/suma_verano) * log2(SU(4)/suma_verano);
end

cociente_TR_verano = 0;
if (TR(4) > 0)
    cociente_TR_verano = (TR(4)/suma_verano) * log2(TR(4)/suma_verano);
end

MI_VERANO = -(cociente_CDD_verano + cociente_FG6_verano + cociente_ID_verano +
cociente_R20_verano + cociente_SU_verano + cociente_TR_verano);

%Otoño.
suma_otono = CDD(5)+FG6(5)+ID(5)+R20(5)+SU(5)+TR(5);

%Influencia en MI en otoño.
cociente_CDD_otono = 0;
if (CDD(5) > 0)
    cociente_CDD_otono = (CDD(5)/suma_otono) * log2(CDD(5)/suma_otono);
end

cociente_FG6_otono = 0;
if (FG6(5) > 0)
    cociente_FG6_otono = (FG6(5)/suma_otono) * log2(FG6(5)/suma_otono);
end

cociente_ID_otono = 0;
if (ID(5) > 0)
    cociente_ID_otono = (ID(5)/suma_otono) * log2(ID(5)/suma_otono);
end

cociente_R20_otono = 0;
if (R20(5) > 0)

```

```
    cociente_R20_otono = (R20(5)/suma_otono) * log2(R20(5)/suma_otono);  
end  
  
cociente_SU_otono = 0;  
if (SU(5) > 0)  
    cociente_SU_otono = (SU(5)/suma_otono) * log2(SU(5)/suma_otono);  
end  
  
cociente_TR_otono = 0;  
if (TR(5) > 0)  
    cociente_TR_otono = (TR(5)/suma_otono) * log2(TR(5)/suma_otono);  
end  
  
MI_OTONO = -(cociente_CDD_otono + cociente_FG6_otono + cociente_ID_otono +  
cociente_R20_otono + cociente_SU_otono + cociente_TR_otono);
```

*Published with MATLAB® R2020a*